

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ. Ч. 1: ПРИМЕНЕНИЕ ИТ МЯГКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ**

**Зрелов Пётр Валентинович<sup>1</sup>, Катулин Михаил Сергеевич<sup>2</sup>,  
Решетников Андрей Геннадьевич<sup>3</sup>, Ульянов Сергей Викторович<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Кандидат физико-математических наук, доцент;  
Государственный университет «Дубна»;  
Россия, 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;  
Начальник отдела;  
Объединенный институт ядерных исследований;  
Россия, 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6;  
e-mail: zrellov@jinr.ru

<sup>2</sup>Инженер-программист;  
Объединенный институт ядерных исследований;  
Россия, 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6;  
e-mail: m.katulin@jinr.ru.

<sup>3</sup>Кандидат технических наук, доцент;  
Государственный университет «Дубна»;  
Россия, 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;  
Старший научный сотрудник;  
Объединенный институт ядерных исследований;  
Россия, 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6;  
e-mail: agreshetnikov@gmail.com.

<sup>4</sup>Доктор физико-математических наук, профессор;  
Государственный университет «Дубна»;  
Россия, 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;  
Главный научный сотрудник;  
Объединенный институт ядерных исследований;  
Россия, 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6;  
e-mail:ulyanovsv46\_46@mail.ru.

Представлен первый этап программного инструментария QSCIT (Quantum Soft Computational Intelligence Toolkit), основанный на технологии мягких вычислений - SCOptKB™, предназначенный для проектирования (на втором этапе) робастных баз знаний в самоорганизующихся интеллектуальных системах управления. Применение инструментария QSCOptKB™ на технологии квантовых вычислений на втором этапе ИТ проектирования робастных систем управления рассмотрен в Части 2 на аналогичном примере интеллектуального управления давлением азота в криогенной установке испытательного стенда сверхпроводящих магнитов.

**Ключевые слова:** квантовый оптимизатор баз знаний, квантовый нечеткий вывод, квантовая самоорганизация, мягкие вычисления.

**Для цитирования:** \_\_\_\_\_

Интеллектуальные системы управления в экспериментальных физических комплексах. Ч. 1: Применение ИТ мягких вычислений / П. В. Зрелов, М. С. Катулин, А. Г. Решетников, С. В. Ульянов // Системный анализ в науке и образовании: сетевое научное издание. 2023. № 4. С. 91-128. EDN: YOPRC. URL : <https://sanse.ru/index.php/sanse/article/view/599>.



Статья находится в открытом доступе и распространяется в соответствии с лицензией Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (CC BY 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>

**INTELLIGENT CONTROL SYSTEMS IN EXPERIMENTAL PHYSICAL COMPLEXES.  
PART 1: APPLICATION OF IT SOFT COMPUTING****Zrelov Petr V.<sup>1</sup>, Katulin Mikhail S.<sup>2</sup>,  
Reshetnikov Andrey G.<sup>3</sup>, Ulyanov Sergey V.<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>PhD in Physics and Mathematics, associate professor;  
Dubna State University;  
19 Universitetskaya Str., Dubna, Moscow region, 141980, Russia;  
Head of division;  
Joint Institute for Nuclear Research;  
6 Joliot-Curie St, Dubna, Moscow Region, 141980, Russia;  
e-mail: zrelov@jinr.ru.

<sup>2</sup>Software engineer;  
Joint Institute for Nuclear Research;  
6 Joliot-Curie St, Dubna, Moscow Region, 141980, Russia;  
e-mail: m.katulin@jinr.ru.

<sup>3</sup>PhD in Engineering sciences, associate professor;  
Dubna State University;  
19 Universitetskaya Str., Dubna, Moscow region, 141980, Russia;  
Senior Researcher;  
Joint Institute for Nuclear Research;  
6 Joliot-Curie street, Dubna, Moscow region, 141980, Russia;  
e-mail: agrehetnikov@gmail.com.

<sup>4</sup>Grand PhD in Physical and Mathematical Sciences, professor;  
Dubna State University;  
19 Universitetskaya Str., Dubna, Moscow region, 141980, Russia;  
Chief Researcher;  
Joint Institute for Nuclear Research;  
6 Joliot-Curie Str., Dubna, Moscow region, 141980, Russia;  
e-mail: ulyanovsv46\_46@mail.ru.

*The first stage of the QSCIT (Quantum Soft Computational Intelligence Toolkit) software toolkit based on soft computing technology - SCOptKB™, applied for design (at the second stage) of robust knowledge bases in self-organized intelligent control systems, is presented. The application of the QCOptKB™ toolkit to quantum computing technology at the second stage of IT design of robust control systems is discussed in Part 2 using a similar example of intelligent nitrogen pressure control in a cryogenic installation of a superconducting magnet test bench.*

**Keywords:** quantum optimizer of knowledge base, quantum fuzzy inference, quantum self-organization, soft computing.

**For citation:**

Zrelov P. V., Katulin M. S., Reshetnikov A. G., Ulyanov S. V. Intelligent control systems in experimental physical complexes. Part 1: Application of IT soft computing. *System analysis in science and education*, 2023;(4):91-128 (in Russ). EDN: YPOPRC. Available from: <https://sanse.ru/index.php/sanse/article/view/599>.

## 1. Сквозные квантовые ИТ в решении проблемы эксплуатации и устойчивого управления сверхпроводящих ускорителей - введение

В настоящее время в физике высоких энергий особое внимание исследователей фундаментальных проблем строения материи привлекают вопросы, связанные с возникновением Вселенной и особенно физические процессы, происходившие после так называемого «большого взрыва». С целью проведения таких исследований в Дубне в Объединённом институте ядерных исследований (ОИЯИ) создаётся ионный коллайдер – *Nuclotron based Ion Collider Facility (NICA)* на энергию  $4 \div 11$  ГэВ на нуклон. Комплекс NICA включает в себя два синхротрона («Бустер» и «Нуклотрон») и «Коллайдер» – накопительное кольцо ускоренных пучков ядер с двумя местами их столкновений, в которых расположены детекторы, регистрирующие фрагменты реакций, *Multi Purpose Detector (MPD)* – многофункциональный детектор и *Spin Physics Detector (SPD)* – детектор для исследования физики спина [1-6].

Мегапроект NICA ставит перед его участниками беспрецедентные задачи для квантовой релятивистской физики, связанные с исследованием кварк-глюонной плазмы вблизи точки фазового перехода ядерной материи [5,6]. Сложность реализации такого проекта вызывает необходимость использования квантовой релятивистской информатики (КРИ) [7-9] в процессах сбора, обработки и передачи данных, а также формирования физически корректной интерпретации полученных результатов. КРИ, в свою очередь, обуславливает применение сквозных квантовых цифровых технологий, *GRID*-технологий и суперкомпьютинга, как в решении различных задач, возникающих в процессе реализации проекта, так и в системах управления оборудованием при его наладке и эксплуатации.

Например, чтобы обеспечить требуемые параметры в коллайдере с такой энергией, необходимо адиабатическое охлаждение пучков, как при накоплении, так и в процессе эксперимента [1-5], а сведение пучков в точку столкновения для получения необходимой светимости требует оперирования статистически большим количеством недостаточно точно определённых данных. Так, приходится осуществлять сбор и обработку больших потоков неоднородных экспериментальных данных и принимать решение в условиях информационного риска при формализации и установления логически непротиворечивой физической корректности и математической строгости модели исследуемого процесса.

В этом случае физическая модель объекта управления и его математическая модель относятся к т. н. слабо формализованным моделям, а корректное определение динамики объекта и управления им требует привлечения новых информационных технологий (ИТ) и методов интеллектуального управления [7-11], позволяющих компенсировать неполное знание свойств объекта соответствующей спроектированной базой знаний в системе управления.

*Примечание.* Отметим, что сквозные цифровые технологии – технологии, находящие своё применение в различных областях, например, рыночных секторах экономики. Официально приоритетные в РФ сквозные цифровые технологии определены распоряжением Правительства №1632-р от 28.07.2017 г., которым была утверждена программа «Цифровая экономика»: Большие данные; Нейротехнологии и искусственный интеллект; Технологии распределенного реестра; Квантовые технологии; Новые производственные технологии; Интернет вещей; Компоненты робототехники и сенсорики; Технологии беспроводной связи; Технологии виртуальной и дополненной реальностей.

Подобный проект, в котором осуществлялся процесс столкновения ускоренных протонных пучков, был успешно реализован в Европейском исследовательском ядерном центре (CERN) и позволил, в частности, коллаборации физиков из различных стран экспериментально обнаружить существование элементарной частицы (бозона Хиггса), связанной с таким свойством материи, как гравитационное взаимодействие. Одну из важнейших ролей в полученном результате сыграло применение *GRID*-технологии сбора и обработки данных, разработанной в ЛИТ им. М.Г. Мещерякова ОИЯИ.

С точки зрения физики, такого рода мегаустановки относятся к классу плохо формализуемых систем, а с точки зрения теории и систем управления оптимальное управление подобного рода физическими системами сталкивается с рядом проблем и одна из них - нештатные ситуации. Так, например, опыт, приобретённый в Лаборатории физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина (ЛФВЭ) ОИЯИ в результате эксплуатации первого в мире сверхпроводящего ускорителя ядер «Нуклотрон», показал [7,8] возможность возникновения трудностей управления ускорительным комплексом в нештатных и непредвиденных ситуациях, возникавших в течение сеансов работы (см. рис 1).



Рис. 1. Установка НИКА и возможные нештатные и непредвиденные ситуации управления

Перечислим некоторые из них:

- непредвиденная просадка непредвиденное падение напряжения электроснабжения, приводящая к перезагрузке компьютеров, перенастройке системы задающей электроники управляющих сигналов и других систем;
- нештатный переход сверхпроводящих магнитных структур в нормальное состояние с экстренной эвакуацией запасённой энергии, например, вследствие непредвиденного облучения ускоряемым пучком сверхпроводящих обмоток или появление помех, воздействующих на датчики перехода сверхпроводящих обмоток;
- возникновение, например, при некоторых режимах работы помех ВЧ станций, превышающих порог чувствительности системы защиты от переходов магнитов в нормальное состояние, что приводит к экстренному срабатыванию системы защиты;
- сбои или ошибки в работе управляющей электроники или ускоряющих ВЧ - станций в связи с неисправностями (дефектами) или износом оборудования;
- нештатные потери и снижение интенсивности пучка при переходных режимах изменения магнитного поля ускорительного кольца;
- потери при транспортировке и переводе пучка между отдельными структурами ускорительного комплекса;
- наводки от ускоряющих ВЧ станций на пикап – электроды, диагностирующие динамику пучка, в частности, при низких интенсивностях;
- нештатные ситуации с охлаждающими и вакуумными системами кольца.

Традиционные системы управления принципиально не учитывают возникновение нештатных ситуаций управления и не включают в контур управления человеческий фактор, что не гарантирует своевременного достижения цели управления – получение максимальной интенсивности ускоренного пучка и устойчивое повторение требуемых режимов ускорения с минимальными затратами полезных ресурсов, например, таких, как: время настройки и проведения соответствующих исследований, электроэнергия и т.п. Это связано с тем, что классические методы теории управления обладают методами синтеза и проектирования для хорошо формализованных и хорошо описанных объектов управления, функционирующих в заранее известных условия и ситуациях.

Ситуация с достижением устойчивого управления сверхпроводящих ускорительных систем также осложняется следующими обстоятельствами: 1) эффектом несохранения постоянства физических свойств ряда систем в течение сеанса работы ускорительного комплекса и особенно от сеанса к сеансу, что требует затрат ресурсов на исследование причин и настройку режимов функционирования. 2) Изменением компоновки ускорителя - замена элементов, реконфигурация и реинжиниринг структуры. 3) Работа с пучками различных ионов и ядер, что требует исследования и учёта индивидуальных характеристик. 4) Неизбежная неоднородность полей сверхпроводящих магнитных элементов структуры установки мн. др.

Перечисленные обстоятельства и их индивидуальные особенности предопределяют скрытность и недоопределённость параметров физических и математических моделей, и должны учитываться в базах знаний интеллектуальных регуляторов. Квантовые сквозные ИТ позволяют спроектировать иерархические интеллектуальные системы управления, позволяющие перераспределить степень ответственности принятия решения в зависимости от динамически изменяющейся ситуации.

Рис. 2 иллюстрирует возможные источники возникновения непредвиденных и нестандартных ситуаций управления в динамических системах, зависящие от особенностей объекта управления.



Рис. 2. Классификация источников нестандартных ситуаций в объекте управления

Для разработки эффективного управления в условиях непредвиденных (нестандартных) ситуаций управления физическими объектами с недоопределенными параметрами выбраны технологии мягких и квантовых вычислений. В данной главе рассмотрим основные этапы и особенности применения технологии мягких вычислений к одной из подсистем, в частности системе азотного охлаждения сверхпроводящего (СП) магнита фабрики магнитов ЛФВЭ.

Примечание. Для компенсации возникающих в процессе моделирования и эксперимента аппроксимаций и упрощений, требуются новые принципы теории искусственного интеллекта в виде сбора и интеллектуальной обработки больших структурированных данных, робастного интеллектуального управления физическим экспериментом и соответствующего интеллектуального инструментария исследования (computational intelligence toolkit), позволяющие ослабить влияние ошибки аппроксимации на качество разработанной модели управления и сформировать робастные модели физических объектов, не чувствительных к изменениям условий функционирования и внутренним изменениям параметров структуры.

В результате возникает проблема разработки модели физического или логического объектов и самого интеллектуального управления робастным физическим и логическим экспериментом с учётом, например, начальной априорной информации об объекте других особенностей. Трудности поиска решения такой задачи, в свою очередь, связаны с необходимостью реализации ряда физических и информационно-термодинамических принципов робастного интеллектуального управления.

К таким принципам в первую очередь относятся:

- принцип компенсации информационной неполноты описания модели (в общем случае слабо структурированных) объекта управления (ОУ) выбором соответствующего уровня интеллектуальных вычислений (ИВ);
- принцип соответствия алгоритма интеллектуального управления уровню сложности и неполноты представления знаний о внешней среде функционирования ОУ (связь информационной энтропии с мерой алгоритмической сложности Колмогорова);

- принцип минимума потерь полезного ресурса (минимум обобщённой энтропии – физический закон оптимального управления) в системе «объект управления + регулятор»;
- принцип не разрушения и повышения эффективности нижнего исполнительского уровня системы управления физическим экспериментом за счёт самоорганизации баз знаний (БЗ) интеллектуального регулятора;
- принцип синергизма извлекаемой скрытой квантовой информации из классических состояний спроектированных процессов управления.

Выполнение и реализация новых физических (информационно-термодинамических) принципов интеллектуального робастного управления осуществляются на основе решения следующих трех принципиальных проблем [11].

А. В первом случае, в отличие от прямой задачи (описания знаний количественными характеристиками), рассматривается решение обратной задачи теории искусственного интеллекта: извлечение, обработка и формирование знаний из количественных данных физических и логических экспериментов. В этом случае разработанная технология проектирования объективных БЗ на основе оптимизаторов БЗ на мягких и квантовых вычислениях исключает субъективизм экспертных оценок, обеспечивает достижение требуемого уровня робастности интеллектуальных систем управления (ИСУ).

Б. Во втором случае рассматривается проблема разработки и физического обоснования математической модели квантового алгоритма управления самоорганизацией знаний для формирования робастных БЗ в реальном времени. Важна при этом роль прямых аналогов физических (квантовых и термодинамических) эффектов в реализации процесса гарантированного достижения качества управления на основе технологии квантовых, мягких и дробных вычислений.

При этом основное внимание уделяется описанию и интерпретации качественных особенностей биологически воспроизводимой (био-инспирированной) эволюции самоорганизации, основные компоненты которой описываются квантовыми операторами и составляют физическое содержание разработанной модели квантового алгоритма управления процессом самоорганизации (см. Часть 2).

В этом случае рассматривается задача робастного управления в непредвиденных ситуациях на основе квантовых стратегий принятия решений в виде программного инструментария квантового нечёткого вывода как частного случая разработанного квантового алгоритма управления самоорганизацией знаний.

В. Решение третьей проблемы демонстрирует результаты применения ИТ проектирования робастных БЗ непосредственно в структуре ИСУ. При этом существуют особенности проектирования робастных БЗ для непредвиденных ситуаций управления физическим экспериментом и в условиях информационного риска для ИСУ, включающих в свою структуру оптимизаторы БЗ.

Синергизм неточной (*imperfect*) информации и синергетический эффект квантовой самоорганизации БЗ в условиях непредвиденных ситуаций основан на технологии извлечения, скрытой в классических состояниях (неизмеримой в общем виде классическими приборами) квантовой информации (дополнительный информационный ресурс).

Проблема робастной (малочувствительной к изменениям внешних и внутренних условий функционирования) и устойчивой работы мегаустановок (типа *NISA*) является одной из самых актуальных и трудных при эксплуатации и проведения физических дорогостоящих экспериментов на коллайдере. Применение систем управления на базе теории искусственного интеллекта является наиболее привлекательным при решении указанной и смежных с ней проблем и может гарантировать достижение поставленной цели управления, в том числе в условиях возникновения нештатных ситуаций.

При применении методов систем с искусственным интеллектом сталкиваются с проблемой извлечения знаний и построения моделей физических систем по большим экспериментальным не структурированным данным, включая поиск информативных (в общем случае неизвестных заранее) признаков (задача Гровера поиска «иголки в стоге сена»). Решение указанных и смежных задач предлагается осуществлять на основе ИТ, основанных на квантовых мягких вычислениях, и с разработкой интеллектуальных систем управления с иерархической структурой баз знаний.

Есть все основания полагать, что интеллектуальные методы управления, основанные на классических и квантовых алгоритмах, позволят формировать оптимальные управляющие воздействия на физические процессы, связанные с формированием устойчивой динамики пучков и спиновых состояний ускоряемых ядер, а также управлять условиями сведения встречных пучков в коллайдере.

Далее будут обсуждаться и предлагаться решения задачи выбора и разработки программно-аппаратной платформы верхнего уровня информационной технологии иерархического интеллектуального управления, не разрушающей существующий и реализуемый инфраструктурный программно-аппаратный уровень управления комплекса *NICA*.

Предварительно рассмотрим некоторые особенности системы управления ускорительного комплекса *NICA*.

## 2. Современные системы управления ускорительными комплексами на примере коллайдера *NICA*

Управление современным ускорительным комплексом требует применения распределенной системы с множеством обратных связей. Основные функции такой распределенной системы управления ускорительным комплексом, следующие:

- сбор и обработка данных о процессах в подсистемах комплекса;
- выбор и настройка необходимого режима ускорения с учётом особенностей проводимого физического эксперимента, например, энергии и вида ускоряемых ионов;
- оценка ситуации и принятие необходимых решений в случае возникновения неисправностей;
- учет изменений, происходящих в аппаратуре ускорителя, для прогнозирования возможных неисправностей;
- моделирование и анализ работы различных взаимосвязанных систем ускорителя с целью получения обучающих сигналов, настройки и оптимизации процессов.

В частности, одной из задач последнего типа является автоматическое регулирование (подстройка) параметров магнитного поля, определяющих отклонение орбиты, частоту бетатронных колебаний и ширину полос неустойчивости. Эти операции производятся с использованием информации, полученной в результате предварительных магнитных измерений, а также информации о состоянии динамики пучка ускоряемых частиц.

Для выполнения перечисленных задач ИСУ *NICA* обеспечена структурой многоканальной передачи данных (*GRID*), локальными управляющими системами с интегрированными БЗ, информационными технологиями проектирования БЗ интеллектуальных систем управления и *on-line* режим с вычислительным ресурсом суперкомпьютеров МЛИТ Лаборатории информационных технологий им. М.Г. Мещерякова (ЛИТ) ОИЯИ.

Проанализирована и обоснована необходимость применения сквозных квантовых технологий интеллектуальных вычислений в задачах робастного управления элементами структуры сложного экспериментального ускорительного комплекса на примере мега-сайнс проекта *NICA*. Приведено описание возможных нештатных ситуаций, дана их классификация с целью включения корректировок принятия решений применением продукционных логических правил баз знаний интеллектуальных систем управления с учетом возникающего приращению информационного риска. Предложена двухуровневая интеллектуальная система управления физической экспериментальной установкой комплекса *NICA* (ионный коллайдер – *Nuclotron based Ion Collider Facility (NICA)* на энергию пучков ионов  $4 \div 11$  ГэВ на нуклон), в которой на нижнем исполнительном уровне находится традиционная система управления, основанная на системе управления *TANGO Controls (TC)*, а на верхнем (интеллектуальном) уровне управляющие воздействия формируются с помощью методов квантовых сквозных ИТ проектирования квантового нечёткого регулятора (КНР).

В состав элементов структуры управления этого мегапроекта входят устройства и протоколы синхронизации работы системы ускорителя по времени и магнитному полю, аппаратура первичной обработки данных, аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи, интерполирующие устройства, устройства представления данных, вычислительные ресурсы многофункциональной информационно вычислительной системы и др. При этом в настоящее время рассматриваются вопросы

применения специализированных программных инструментариев и встраиваемых алгоритмов адаптации, обучения и самоорганизации систем управления в режимах настройки и эксплуатации, а также разработка интеллектуальных интерфейсов пользователя.

Фактически, эти системы реализуются в виде единого программно-аппаратного инженерно-технического экспериментального комплекса, в который входят СП магниты и линзы, корректирующие элементы, ВЧ станции, устройства ввода/вывода и охлаждения пучка и др. как исполнительные органы, также системы сигнальных электродов (включая импульсные дефлекторы для измерения частот бетатронных колебаний), датчиков тока пучка, профилометров (т.е. системы сбора показателей динамики), как измерительные органы и управляющие локальные вычислительные машины (контроллеры) с системой передачи, и обработки данных, как устройства, осуществляющие переработку информации в соответствии с регулируруемыми алгоритмами.

С этими системами регулирования, использующими информацию от ускоренного пучка и предварительно полученные данные магнитных и геодезических измерений, тесно связаны система автоматического управления частотой и фазой ускоряющего напряжения ВЧ станции по пучку и система программной коррекции компонент магнитного поля.

Основой для реализации программной части системы управления ускорительного комплекса *NICA* является «*TANGO Controls*» [6,12,13]. Это современная автоматизированная система управления (АСУ), основанная на *CORBA*, которая активно развивается в европейских ускорительных организациях, таких как *ESRF*, *Alba*, *Soleil* в течение последних десяти лет. Основная концепция *TANGO* – предоставить единообразие в управление всеми приборами и подсистемами (в том числе классическими ПИД - регуляторами). Системы управления на основе ТС позволяют создавать распределенные системы управления любой иерархической сложности.

Структура системы управления на базе ТС представлена на рис. 3, где также показаны потоки данных для адаптации и обучения ИСУ, встраиваемые программные контроллеры и интерфейсы программного инструментария.

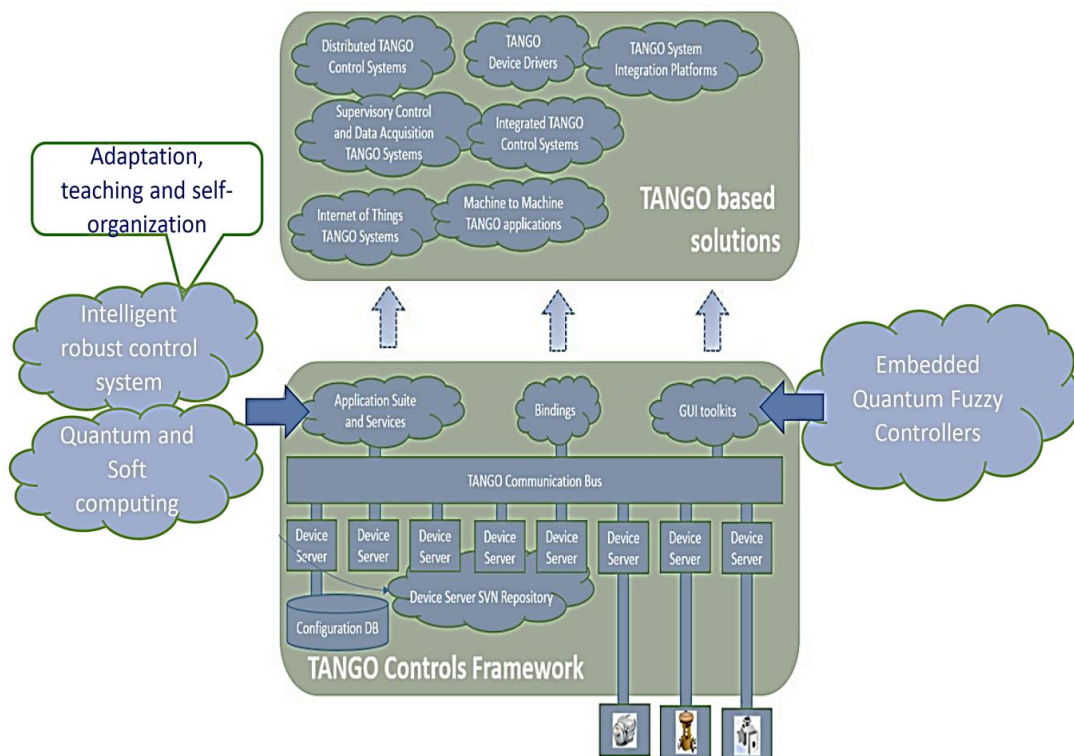


Рис. 3. Взаимосвязь структуры традиционной аппаратной реализацией АСУ и ИСУ [7,8]

Вычислительная система ускорительного комплекса, построенная на базе технологий ТС, реализует простую и быструю разработку интерфейсов, сторонних приложений и их развертывание. Однако, базовые решения ТС не поддерживают технологии интеллектуального робастного управления на ос-



нове квантовых и мягких вычислений (см. рис 3). Вследствие этого, служебные операторы не обеспечены соответствующим инструментариями, позволяющим вводить дополнительные качества управления – адаптацию, обучение, самоорганизацию в систему управления элементами ускорительного комплекса. Каждый раз во время запуска или реконфигурации оборудования, перевода в новое целевое состояние параметров пучка ускорителя, они будут проводить заново настройку подсистем ускорительного комплекса. Присутствует также «человеческий фактор», повышающий уровень информационного риска при принятии решения.

Важно отметить, что сложность физической установки и проводимых исследований, выражаемая в количестве информации, получаемой в процессе проведения экспериментов, работы установки в заданных режимах, адаптации, настройки и обучения, является источником обеспечения эффективности работы системы управления ускорителем.

Такая распределенная система должна выполнять следующие функции:

- генерирование и распределение в течение цикла ускорения серии импульсов, синхронизирующих работу всех устройств системы управления ускорителем во времени и в зависимости от ведущего магнитного поля;
- для программирования работы ускорителя, в память вычислительной машины записывается несколько программ – баз знаний встраиваемых контроллеров (прошивок), например, программа для включения аппаратуры ускорителя, реализации формы и величины магнитного поля, проведение диагностики неисправностей и оптимизации процесса ускорения, аварийного отключения аппаратуры, накопления знаний (траекторий для процессов обучения) и других данных;
- формирование новых знаний из физически измеряемых сигналов объектов управления, связанных с улучшением рабочих программ интегрированных баз знаний, по мере накопления данных о работе ускорителя; запись экспертом обучающих траекторий движения пучка;
- представление информации на пульте оператора о состоянии пучка, аппаратуры ускорителя и необходимых профилактических мероприятиях, а также обеспечение возможности ручного дистанционного управления любым объектом ускорителя;
- запись информации в структурированной форме для разметки данных обучения и верификации программ управления;
- периодический контроль работы всех элементов системы управления ускорителем.

В частности, для регулирования динамики быстропротекающих процессов, необходимо использовать локальные схемы автоматического регулирования с обратными связями, то есть локальные интеллектуальные системы с интегрированными в них в виде программ робастными БЗ. Воздействие системы управления на такие схемы будет сводиться к сравнительно редкой коррекции параметров БЗ или их обновлению с целью обеспечения оптимальных условий своевременного регулирования с учётом взаимодействия всех компонентов ускорителя.

Применение таких управляющих систем позволяет обеспечить:

- реализацию необходимого режима работы сложного ускорительного комплекса;
- автоматическое решение оптимальным образом задач, возникающих при запуске и эксплуатации ускорителя;
- уменьшение времени включения и выключения систем ускорителя и сокращение числа ошибочных включений;
- обеспечением необходимым инструментарием обслуживающего персонала в эксплуатационном режиме;
- большую гибкость в управлении и изменении режима работы ускорителя;
- исключение влияния субъективных факторов на работу ускорителя.

Рассмотрим конкретный пример разработки ИСУ такого рода объектом управления.

### ***3. Робастная ИСУ расходом жидкого азота в сборнике криогенной установки контроля СП магнитов – наглядный пример (Benchmark)***

Рассмотрим задачу поддержания постоянного уровня и давления в сборнике жидкого азота на экспериментальной установке, предназначенной для контроля изготавливаемых сверхпроводящих (СП) магнитов комплекса. С помощью управления вентилем подачи азота необходимо регулировать давление и расхода азота в сборнике. Отслеживание состояния контура управления происходит по датчику давления и датчику уровня азота.

При этом состояние сверхпроводимости обмотки магнита необходимо поддерживать в точке равновесия допустимого диапазона изменения тока, температуры и магнитного поля (рис. 4).

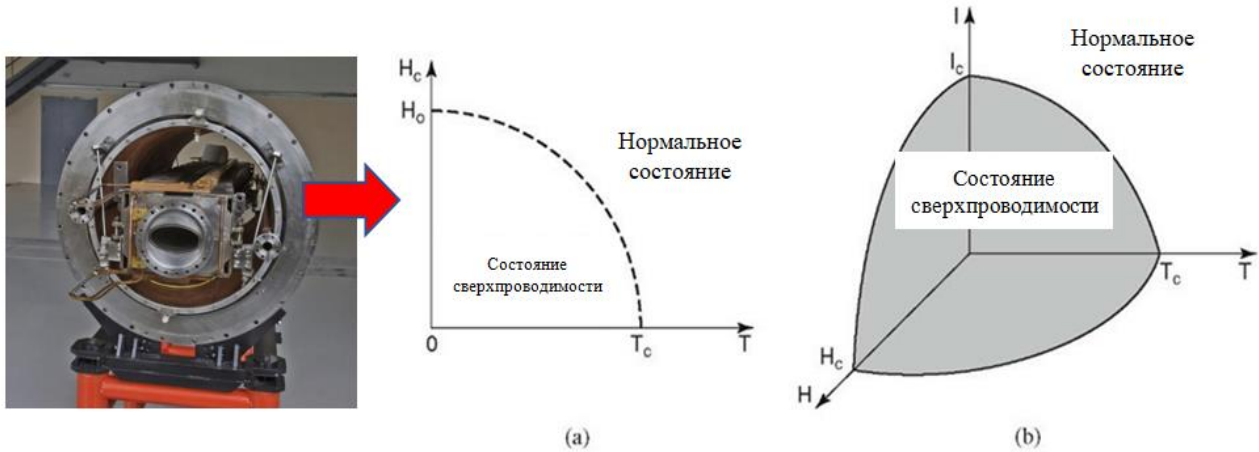


Рис. 4. Область сверхпроводящего состояния обмотки магнита

Сам СП магнитный элемент ускорительного комплекса во время испытаний имеет следующие особенности: теплоприток из-за вихревых токов, приводящих к разогреву сердечника; теплоприток от стенок и неравномерное охлаждение в соединительных узлах. Данные особенности отдельного магнитного элемента, также накладывают сложность управления группой подобных элементов.

Принцип интеллектуального управления подразумевает компенсацию существующих в реальном объекте неопределённых и неточных параметров магнитного элемента за счёт использования технологий мягких и квантовых вычислений и с учётом особенностей в индивидуальных БЗ.

В табл. 1 приведены входные данные – показатели состояния системы и выходные – параметры исполнительных устройств, управляемых с помощью интеллектуальной системы управления условиями состояния азота в сборнике стенда.

Табл. 1. Входные и выходные данные ИСУ расхода азота

Входные данные	Выходные данные
Рамка измерения магнитного поля (данные о состоянии магнитного поля)	Целевое положение заслонки вентилля
Шунта показателя силы тока (данные о величине тока)	Скорость вращения вентилля
Данные о температуре выходного азота	
Данные температуры входного азота	
Задающий сигнал уровня давления	
Задающий сигнал уровня азота в сборнике	

Данные о состоянии уровня азота в сборнике (цистерне)	
---	--

Эффективность прокачки, охлаждения магнитного элемента и поддержание режима сверхпроводимости зависит, в том числе, и от давления в системе охлаждения и уровня азота в сборнике. При этом необходимо учитывать увеличение и уменьшение расхода азота в процессе нагревания и охлаждения магнитного элемента с учётом заложенной неточности исполнительного элемента (вентиля).

На рис. 5 представлен контур управления первого уровня, реализованный в виде пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора с настраиваемыми параметрами регулирования (Кп, Ки, Кд).

Выбор оптимальных параметров управления зависит как от перечисленных особенностей в реализации отдельного магнитного элемента, так и при управлении группой магнитных элементов.

Подход с применением квантовых и мягких вычислений предполагает извлечение оптимальных траекторий изменения параметров управления из различных информационных источников (математическое моделирование, реальный физический сигнал, экспертные оценки, экспериментальные данные) и формирование БЗ встроенных НР для управления параметрами регулятора, а также квантового нечёткого регулятора для управления группой взаимосвязанных магнитных элементов.

Одной из основных идей применения интеллектуального управления является разработка унифицированного инструментария проектирования встраиваемых в физическую установку самоорганизующихся интеллектуальных систем управления (ИСУ) с целью повышения эффективности и надёжности её функциональности при эксплуатации объекта управления (ОУ) [10,11].



Рис. 5. Контур управления первого уровня, на основе встраиваемого программного ПИД- регулятора

Кратко рассмотрим программно-алгоритмическую платформу процесса проектирования встраиваемых нечётких контроллеров для действующего макета дистанционного управления технологического процесса охлаждения сверхпроводящего (СП) магнита.

Основу программно-алгоритмической платформы составляют технологии интеллектуальных вычислений (мягкие и квантовые вычисления, квантовые нечёткие алгоритмы управления и квантовое

нечеткое программирование [14-16]). Применение указанных технологий в системе охлаждения СП магнитов позволяет гарантированно достигать зоны устойчивой сверхпроводимости, при этом улучшая оптимальные показатели по противоречивым критериям качества (температура, расход азота, быстродействие, поддержание требуемого уровня давления, сложность управления).

Сам процесс проектирования основан на принципе сохранения нижнего (исполнительского) уровня классического управления [16], что позволяет учесть особенности комплекса системы управления СП магнитом, состоящего из разнородных модулей со своими протоколами передачи данных и управления (рис. 6).

Такого рода системы в теории интеллектуальных систем называют плохо формализуемыми и слабо структурированными [10,11], исследования такого рода систем являются актуальными в задачах управления в мегасайнс проектах типа NICA [6-9].

Интеллектуальные регуляторы, принципы работы которых основаны на новых сквозных (end-to-end) квантовых информационных технологиях, внедрены на действующем комплексе с использованием классических технологий управления технологическими системами на основе фреймворка TANGO Controls [12]. При этом реализованы программные средства дистанционного управления со встроенными самоорганизующимися квантовыми регуляторами, позволяющие гарантированно достигать цели управления.



Рис. 6. Структурная схема системы связи и подсистем ИСУ с удалённым объектом управления

В Части 1 на примере управления уровнем давления азота в сборнике криогенной установки, как первого этапа процесса охлаждения, рассматривается и обосновывается выбранная структура системы интеллектуального управления.

Целью управления является проверка поддержания устойчивого состояния уровня давления в азотном сборнике, действующего на температуру обмотки магнита в состоянии сверхпроводимости, которое необходимо удерживать в точке равновесия допустимого диапазона изменения тока, температуры и магнитного поля.

На рис. 7 представлен график изменения температуры входа и выхода канала подачи гелия, верхнего и нижнего ярма линзы СП магнита в процессе криогенных испытаний.

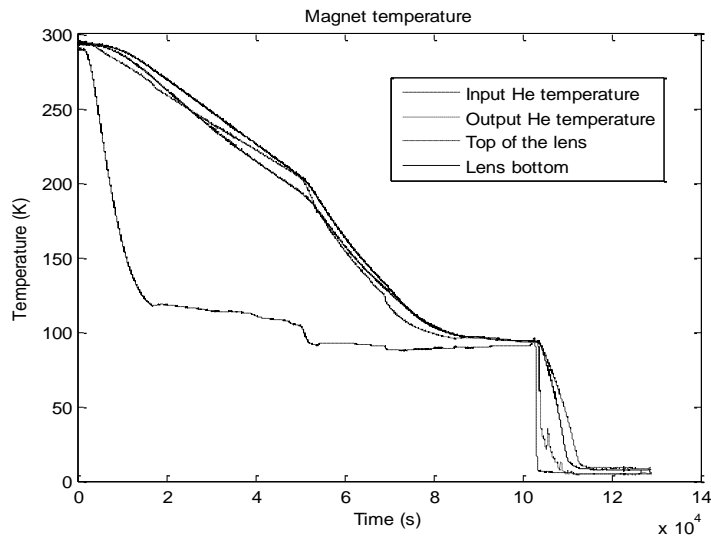


Рис. 7. Показания датчиков температуры линзы СП магнита и гелиевого канала в процессе криогенных испытаний

Блок-схема этого процесса представлена на рис. 8.

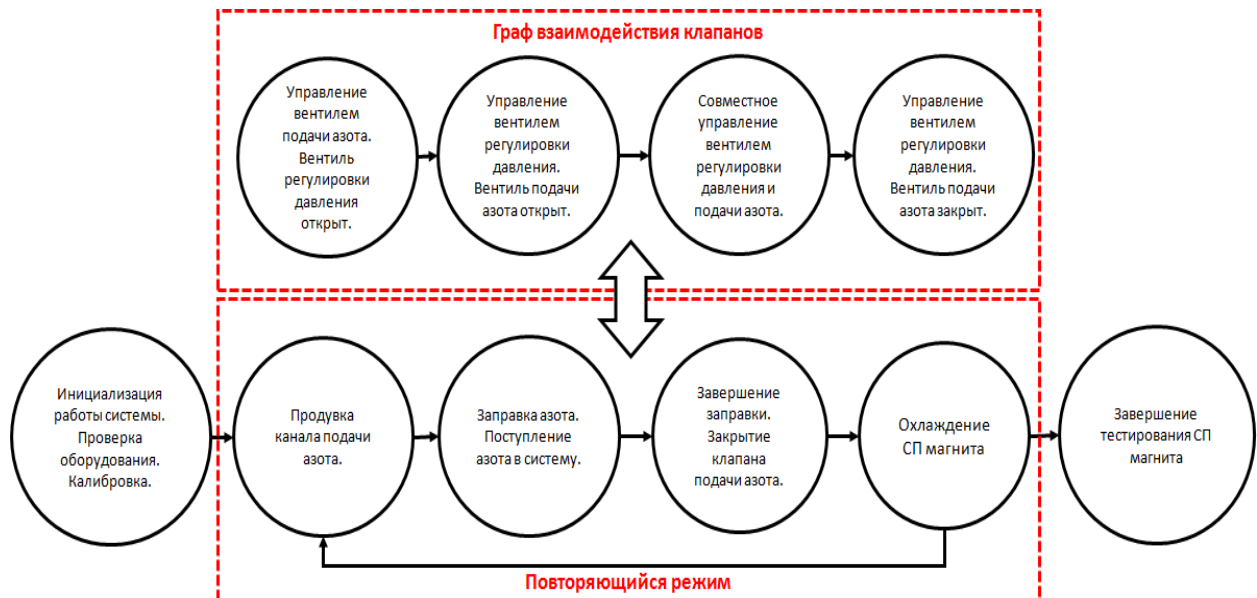


Рис. 8. Режимы функционирования криогенной установки в процессе испытаний

На рис. 9 представлена упрощённая структурная схема контура азотного охлаждения испытательного стенда. В состав структуры входят: вентиль регулировки давления (сброса), вентиль подачи азота (заправки), сборник азота и охлаждаемый элемент СП магнита.

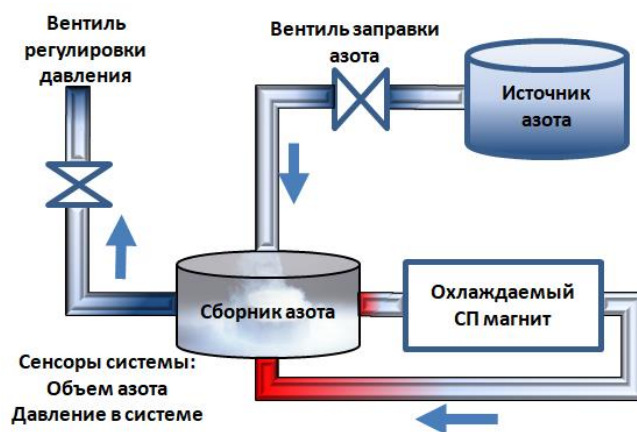


Рис. 9. Структурная схема системы азотного охлаждения СП магнитов на испытательном стенде

Процесс охлаждения жидким азотом состоит из двух этапов: 1) азотный режим, в котором охлаждение экрана и выходных элементов тоководов выполняется азотом, 2) гелиевый режим, в котором азот применяется в том числе и для охлаждения гелия, который в свою очередь охлаждает ярмо и входные тоководы магнита.

При этом оба этапа сопровождаются периодической заправкой азота каждые 1-2 часа. Температурный режим магнита должен пройти несколько стадий для достижения режима сверхпроводимости и его последующей поддержки.

В азотном режиме охлаждения, динамика давления в накопительной ёмкости достаточно стабильна, что позволяет придерживаться расчётного времени охлаждения с соблюдением всех технологических этапов процесса испытания. Однако, с учётом наличия нескольких испытательных сателлитов общего канала заправки азота, целесообразно сокращать время заправки каждого сателлита.

В процессе заправки азотом сначала сбрасывается давление в накопительной ёмкости до атмосферного, затем производится открытие вентиля заправки азота (см. рис. 10), вызывающее резкий рост давления, достигающего пикового значения с последующим снижением и выходом на стабильный рабочий режим.

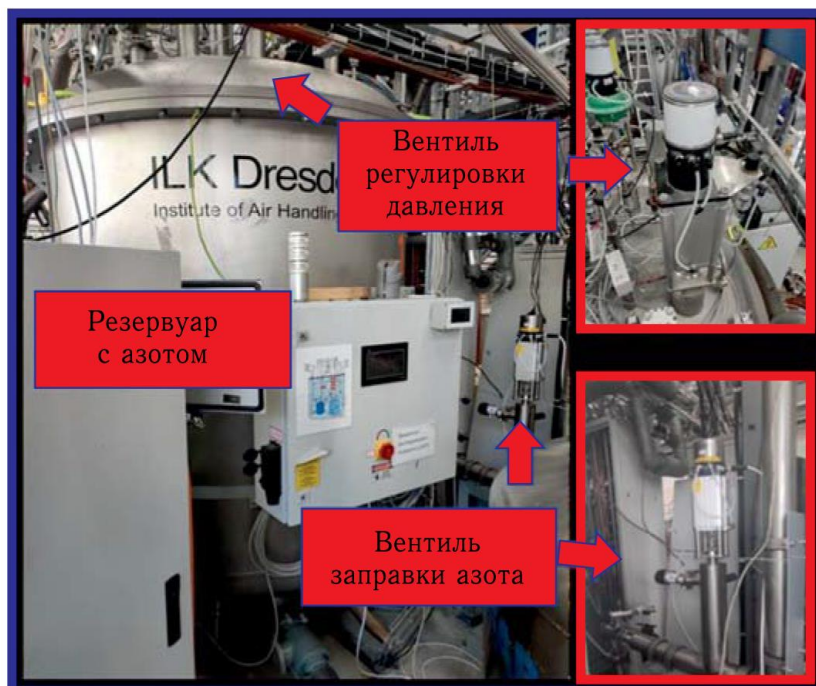


Рис. 10. Установка азотного охлаждения

После закрытия вентиля вентиля заправки давление в системе начинает расти, выполняется включение автоматической системы управления для отработки вентилем регулировки давления переходного процесса, обеспечивая максимальную скорость набора давления при минимальном перерегулировании и времени установки требуемого состояния. Критерием оценки качества управления в азотном режиме является минимизации отклонения давления от целевого значения. Дополнительным, но безусловно важным, критерием является и сам расход полезного ресурса – азота.

Второй (гелиевый) режим может сопровождаться резким понижением давления азота или, наоборот, его ростом. Оператор, управляющий установкой, может регулировать этот процесс вручную, приоткрывая вентиль подачи азота, тем самым управляя динамикой давления в сообщающихся сосудах более стабильной. В этом режиме основным критерием является поддержание заданного значения, поскольку изменение давления будет влиять и на качество охлаждения, и на состояние сверхпроводимости.

На примере криогенного стенда фабрики магнитов, рассмотрим особенности технологического процесса охлаждения СП магнита. Основной задачей криогенного стенда научно экспериментального отдела СП магнитов и технологий (НЭОСМТ) Лаборатории физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина (ЛФВЭ) ОИЯИ является проведение криогенных испытаний СП магнитов типа «Нуклотрон» и получение экспериментальных данных, основываясь на основе которых магниты будут размещаться на кольцах ускорительного комплекса *NICA*. Для двух колец проекта *NICA* (синхротрона бустера и кольца коллайдера) необходимо изготовить более 250 магнитов и провести для них криогенные испытания, удовлетворяющие всем технологическим параметрам.

Для выполнения этой задачи имеется три гелиевых сателлитных рефрижератора (рис. 6.10), содержащих по два испытательных плеча, которые могут работать последовательно.

Каждое испытательное плечо, в свою очередь, имеет по два высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) токоввода (15 кА).

Процесс охлаждения и проведения криогенных испытаний (рис. 8) можно разделить на несколько этапов. В азотном режиме работы сателлитного гелиевого рефрижератора первичный поток гелия к магниту (вентиль *V20* – открыт (рис. 11, п. 1 - вентиль управления потоками)) охлаждается за счёт вторичного потока гелия, проходящего через азотную ванну (вентиль *V2* – открыт (рис. 11, п. 4 - вентиль управления потоками)). Основной задачей такого режима охлаждения является достижение следующих температурных значений (*T*):

- Температура на выходе из магнита на уровне  $T = 90-100K$ ;
- Температура тепловых (медных) экранов на уровне  $T = 78-85K$ ;
- Температура ВТСП части токовводов на уровне  $T = 78-80K$ .

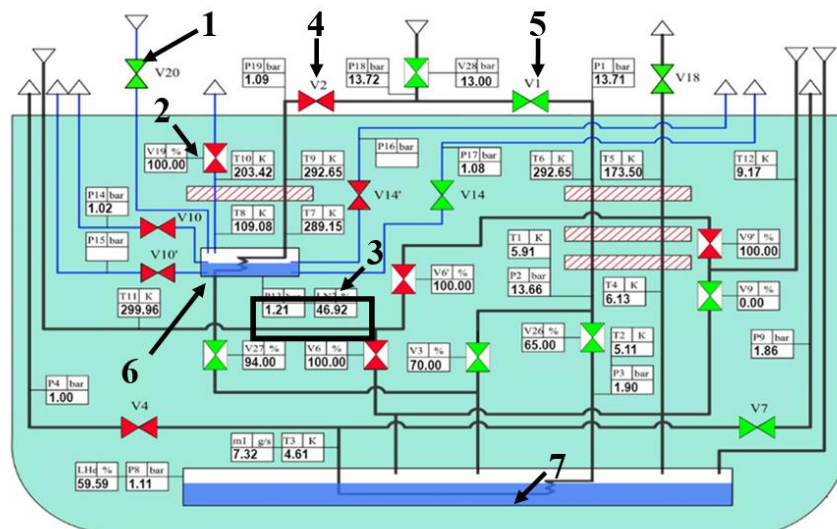


Рис. 11. Интерфейс оператора и схема гелиевого сателлитного рефрижератора

Основной задачей азотного контура в процессе гелиевого режима охлаждения и криогенных испытаний является поддержание температур тепловых экранов и ВТСП части токовыводов на уровне 78-85К. Поддержание температур, в свою очередь, возможно только при наличии необходимого по величине показателя давления (1.20-1.22 бар) в азотном рефрижераторе спутника (рис. 11).

Азотный контур криогенной установки испытательного стенда фабрики магнитов выполняет задачи охлаждения токовыводов и тепловых экранов СП магнита в процессе испытаний. На первом этапе внедрения технологий интеллектуального управления была разработана система, регулирующая давление в азотном контуре, однако, процесс заправки азота автоматизирован не был на этом этапе. Для автоматизации этого процесса был установлен электропневматический клапан, регулирующий подачу азота, и модернизировано программное обеспечение системы управления.

В свою очередь, сам процесс заправки азота технологически сложен и зачастую может вызывать отепление охлаждаемых элементов. Снизить влияние подобных факторов удалось за счёт внедрения нового типа квантового координационного управления (см., Часть 2). Особенностью одновременного управления и процессом заправки, и поддержанием заданного значения давления является использование скрытой нелинейной связи между клапаном регулировки давления и клапаном заправки на основе квантовой корреляции в схеме квантового нечёткого вывода.

Система управления криогенным стендом сверхпроводящих магнитов на принципе отклонения и компенсации ошибки управления на основе глобальной отрицательной связи разработана [13] в ЛФВЭ с использованием TANGO Controls. В её состав входят: система термометрии и система управления спутниковыми рефрижераторами, запись и хранение состояний аппаратных средств, программные модули для сбора и управления данными, система конфигурации, система контроля доступа, веб-служба и клиентские приложения, и т.д.

На рис. 12а представлена структурная схема двухуровневой системы автоматического управления процессом охлаждения азотом на фабрике магнитов (разработка ЛИТ). На схеме представлены различные режимы функционирования регулятора контура управления: ручного (осуществляемого оператором), автоматического на основе ПИД-регулятора и гибридного нечёткого ПИД-регулятора.

Показателями качества процесса управления, реализуемого на основе принципа обратной связи, являются показатели, определяемые непосредственно по переходной характеристике (рис. 12б)) колебательного процесса.

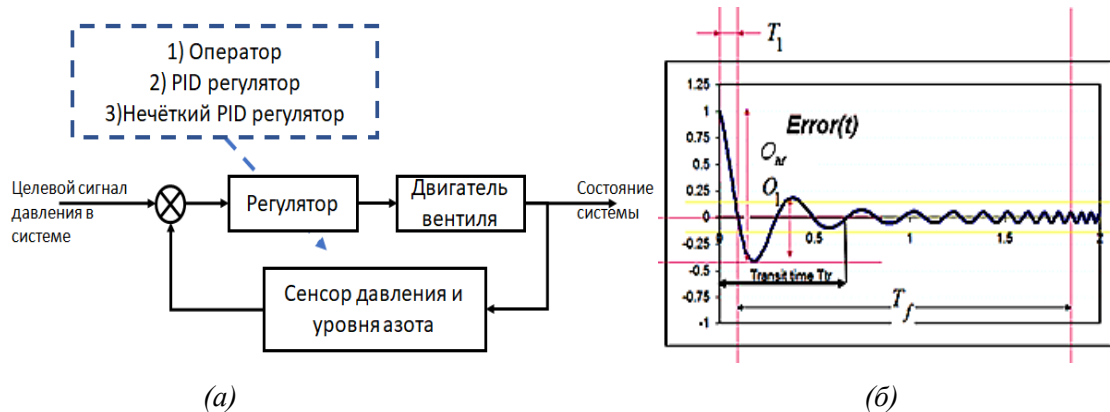


Рис. 12(а) Структурная схема системы охлаждения азотом управления с обратной связью, (б) показатели качества переходного процесса (см. текст)

Быстродействие системы  $T$  рассчитывается следующим образом:

$$T = 1 - \frac{T_1}{T_f},$$

где  $T_f$  – время установления системы и  $T_f \geq T_1$ . Перерегулирование  $O$  рассчитывается по формуле:

$$O = 1 - \frac{O_1}{O_M},$$



где  $O_1$  – диапазон устойчивости системы и  $O_M \geq O_1$ ,  $O_M$  - размах амплитуд переходного процесса (см., Рис. 6.12(б)). Сложность управления  $P$  рассчитывается по формуле:

$$P = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t=0}^T \left( \frac{dK}{dt} \right)^2 dt},$$

где  $K$  – величина управляющего воздействия. Сложность управления отражает оценку проделанной работы исполнительными механизмами за определённый промежуток времени  $T$ .

Применение принципа глобальной отрицательной обратной связи позволяет обеспечить систему устойчивостью и управляемостью. Однако, этого не всегда достаточно для робастного интеллектуального управления [10,11]. В этом случае чувствительность объекта управления к изменениям внутренних и внешних условий функционирования высока, и система управления только на основе ПИД-регулятора не обеспечивает гарантированное достижение цели управления [10].

Важно отметить, что в процессе управления важно также иметь возможность оперативно реагировать на возникновение аварийных ситуаций, в частности:

- рост давления выше 1.30 бар,
- уровень азота в сборнике - выше 100% или ниже 40%,
- температуры азотной части тоководов выше 100К.

Рассмотрим кратко особенности выбираемой системы управления.

ИСУ может работать по нескольким алгоритмам в зависимости от выбранного оператором режима:

- режим гибридного нечёткого ПИД -регулятора – режим эксплуатации установки на основе интеллектуальной системы управления на мягких вычислениях;
- режим обучения глубокой нейронной сети (с дистанционной настройкой);
- режим генетического алгоритма – режим извлечения знаний из реальных траекторий работы установки;
- режим квантового регулятора – интеллектуальный режим функционирования, характеризующийся повышенной надёжностью и качеством управления (см., Часть 2).

В качестве ядра технологии разработки квантового и нечётких регуляторов рассматривается программный оптимизатор баз знаний (ОБЗ) [14-16].

На рис. 13 представлена схема интеллектуального управления физической установкой с использованием оптимизатора баз знаний (ОБЗ). Показана тесная зависимость верификации и идентификации объекта управления (ОУ) с применением технологий и методов обработки и анализа данных, в том числе методов кластеризации на основе выявления информативных признаков на этапах проектирования БЗ.

При этом возможен гибридный подход для формирования как индивидуальной БЗ, так и иерархически связанных БЗ многоагентной системы.

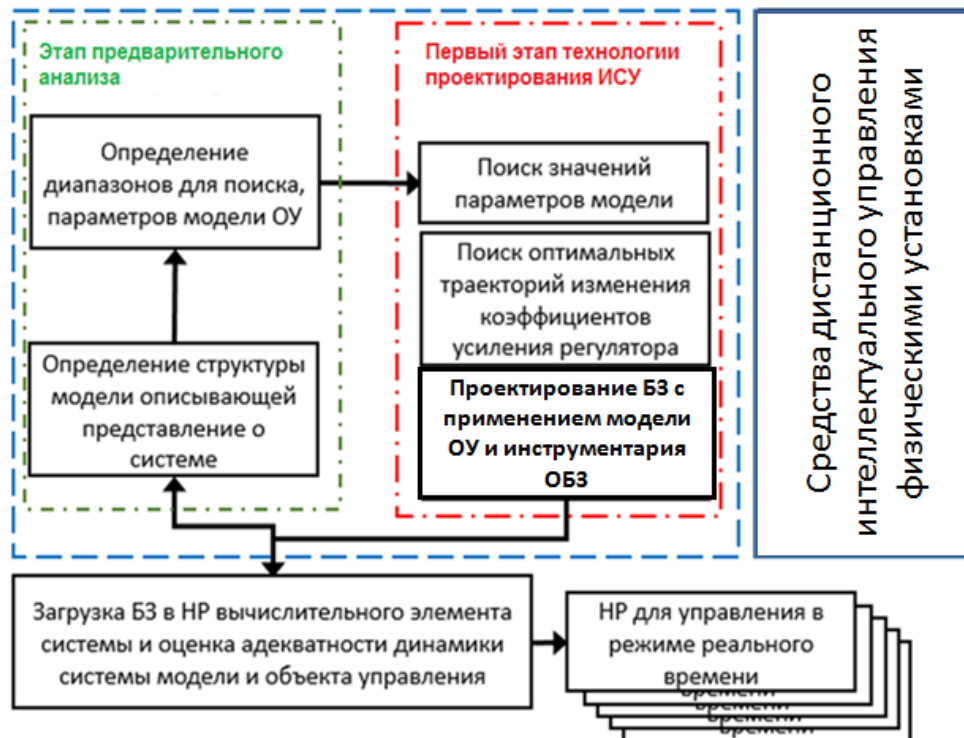


Рис. 13. Проектирование БЗ с применением модели ОУ и инструментария ОБЗ

В частности, обрабатываемые результаты журналов функционирования используются для выявления ошибок управления и коррекции управляющих воздействий. При этом основные функции интеллектуального управления – верификация моделей, идентификация ОУ, формирование обучающих сигналов, обучение квантовых нейронных сетей с применением квантовых генетических алгоритмов [11,16] требует затрат больших вычислительных ресурсов, для этого ОБЗ представляет собой комплекс из трёх распределенных частей – расчётная, работающая удалённо на мощных вычислительных станциях, вторая часть, встраиваемая в объект управления (ОУ) и реализующая алгоритмы взаимодействия с установкой, и интерфейсная часть, предоставляющая доступ к программной и устанавливаемой оператором части. В частности, обучающая выборка, полученная от TANGO Controls, обрабатывается квантовым генетическим алгоритмами в расчётной части ОБЗ. Обмен данными и запуск обработки реализована по распространённому протоколу SSH, который обеспечивает безопасное соединение и возможность передачи данных и программ между агентами.

Встраиваемая компонента TANGO Controls собирает показания параметров установки и пересылает данные, относящиеся к заданному временному интервалу времени для последующей обработки [12,13,17]. Приняв входные значения, расчётная часть ОБЗ оценивает эффективность предыдущего решения – загруженной БЗ в нечёткий регулятор (НР) – и осуществляет формирование новой или корректировку используемой БЗ для проверки следующего решения.

Оптимизация БЗ с использованием дистанционного соединения с ОУ непосредственно с ОБЗ даёт ряд преимуществ:

- позволяет не разрабатывать математическую модель и при этом получать знания о качественном поведении ОУ для построения БЗ;
- дистанционное соединение позволяет оптимизировать БЗ в определённых (типовых) условиях функционирования, и тем самым создавать множество БЗ с высоким качеством управления для различных ситуаций управления.

Отметим, что универсальность технологии дистанционной настройки и передачи БЗ позволяет объекту управления (ОУ) принимать БЗ от блока ОБЗ, или от других ОУ. Это даёт возможность управления структурно новыми объектами, такими как коллективы автономных роботов, многоагентные системы, сложные автоматизированные производства и распределенные системы и др.

Кроме того, данная технология позволяет ОУ обновлять и адаптировать БЗ под конкретную ситуацию управления, в т.ч. нештатную ситуацию, в режиме реального времени функционирования.

Построение НР представляет собой настройку функций принадлежности, применяемых в процессе фазификации и дефазификации, а также формирование правил БЗ. Процесс построения НР может быть выполнен с помощью программного обеспечения Оптимизатор Баз Знаний SCOptKB™ [14,15], однако для этого необходимо сформировать обучающий сигнал.

Таким образом, для построения НР необходимо создать качественный обучающий сигнал. Одновременно это является первым этапом технологии построения квантового нечёткого регулятора [11] для ОУ со слабо формализованными (не учитываемыми в математической модели) параметрами.

#### 4. Формирование обучающего сигнала с применением генетического алгоритма в режиме реального времени

Формирования обучающего сигнала для НР, без использования математической модели возможно, с применением генетического алгоритма в режиме реального времени. На примере системы стабилизации давления рассмотрим задачу извлечения обучающего сигнала с реального объекта управления, функционирующего в режиме реального времени.

В контексте такой задачи весь процесс стабилизации давления представляется в виде интервала времени, необходимого для стабилизации давления из условно начального состояния в требуемое - рабочее. Интервал времени, разбивается на некоторое число малых временных отрезков, где каждому присваиваются определённые значения коэффициентов ПИД-регулятора. Таким образом, набор коэффициентов для каждого отрезка времени и их последовательность, представляет собой траекторию изменения коэффициентов усиления и отдельное проверяемое решение (индивид генетического алгоритма). Записываемые данные изменения ошибок управления и соответствующих интервальных коэффициентов ПИД-регулятора во время работы криогенной установки в режиме стабилизации давления будет составлять обучающий сигнал. Пример изменения давления и коэффициентов представлен на Рис. 14. В качестве обучающего сигнала рассматривается структура данных в виде входных сигналов (ошибок управления)  $e_p$ ,  $e_i$ ,  $e_d$  и соответствующие им выходных – оптимальных коэффициентов усиления  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  ПИД-регулятора.

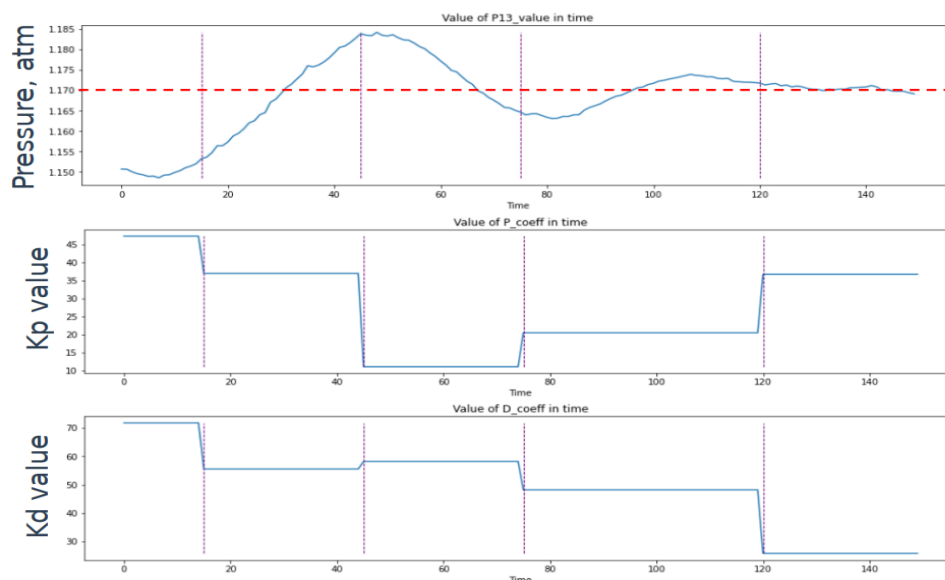


Рис. 14. Пример траектории изменения коэффициентов усиления ПИД-регулятора (приведены примеры двух коэффициентов  $K_p$  и  $K_d$ )

Задача формирования обучающего сигнала сводится к задаче поиска оптимальной траектории изменения коэффициентов усиления ПИД-регулятора. Для поиска оптимальной траектории изменения коэффициентов ПИД-регулятора был выбран генетический алгоритм (ГА) не случайно. Применение ГА получило широкое распространение в решения конкретных инженерных задач, из-за его проблемной независимости, отсутствия необходимости подсчёта градиенты целевой функции для каждого решения, и возможности применения без использования сложных аналитических расчётов. Кроме того,

ГА был апробирован для получения обучающего сигнала, позволяющего проектировать БЗ НР для объектов без математической модели на примере задачи «каретка - перевёрнутый маятник».

За основу был взят ГА, описанный в [18]. В алгоритме применено двухточечное скрещивание с вероятностью 0.3. Вероятность мутации была установлена равной 0.1. Также был применён элитный отбор - 10% лучших траекторий изменения коэффициентов переходили в следующее поколение без изменений. Было проверено 10 поколений по 50 решений (особей) в каждом. Для каждого коэффициента были определены интервалы допустимых значений при выборе которых были использованы значения эмпирически подобранных коэффициентов ПИД регулятора. ГА функционирует в режиме реального времени на испытательном стенде фабрики магнитов. Обеспечение одинаковых начальных условия обучения, для каждой проверяемой траектории, реализуется за счёт сброса давления до одной и той же заранее заданной величины. Каждая траектория состояла из пяти временных интервалов со своими коэффициентами ПИД-регулятора. Для каждого проверяемого решения процесс стабилизации длился 10 минут. Оценка качества проверяемой траектории рассчитывалось как интеграл модуля ошибки отклонения от целевого значения давления. Сходимость результатов работы ГА определена по нисходящей линии тренда на графике значений функции пригодности с каждой новой проверяемой траекторией (рис. 15).

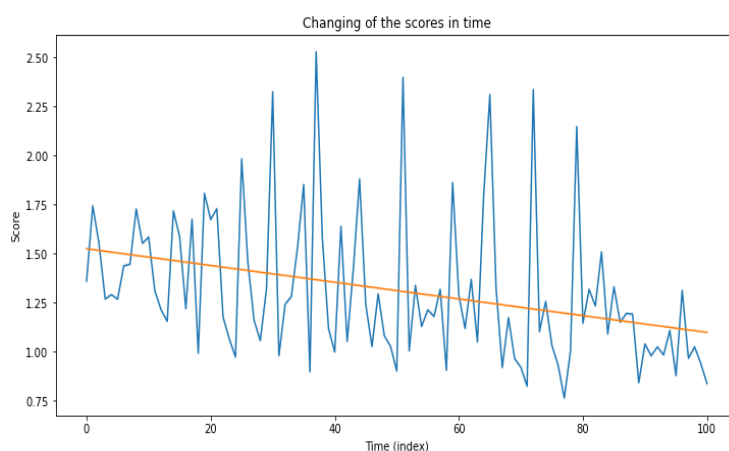


Рис. 15. Изменение значения функции пригодности с каждым новым проверяемым решением

В результаты были выбраны лучшие наборы коэффициентов ПИД-регулятора для каждого временного интервала и составлена таблица обучающего сигнала, состоящая из значений ошибок отклонения давления от целевого значения и соответствующих им коэффициентов ПИД-регулятора (рис. 16).

	A	B	C	D	E	F
1	err	err_i	err_d	P_coef	I_coef	D_coef
2	0.020254	0.020254	0.020254	49.3988	37.68156	148.257
3	0.0204835	0.0407375	0.000229478	49.3988	37.68156	148.257
4	0.0211214	0.0618589	0.000637889	49.3988	37.68156	148.257
5	0.0222429	0.0841018	0.00112152	49.3988	37.68156	148.257
6	0.0229059	0.107008	0.000663042	49.3988	37.68156	148.257
7	0.0230844	0.130092	0.000178456	49.3988	37.68156	148.257
8	0.0229796	0.153072	-0.000104785	49.3988	37.68156	148.257
9	0.0229883	0.17606	0.0000870228	49.3988	37.68156	148.257
10	0.0228355	0.198896	-0.000152826	49.3988	37.68156	148.257
11	0.0223869	0.221282	-0.000448585	49.3988	37.68156	148.257
12	0.0218146	0.243097	-0.000572324	49.3988	37.68156	148.257
13	0.0212793	0.264376	-0.00053525	49.3988	37.68156	148.257
14	0.0194484	0.283825	-0.00183094	49.3988	37.68156	148.257
15	0.0185505	0.302375	-0.000897884	49.3988	37.68156	148.257
16	0.0173177	0.319693	-0.00123286	49.3988	37.68156	148.257
17	0.0219506	0.0219506	0.0219506	40.9325	35.73909	122
18	0.023212	0.0451626	0.00126135	40.9325	35.73909	122
19	0.0239828	0.0691453	0.000770807	40.9325	35.73909	122
20	0.0249614	0.0941067	0.000978589	40.9325	35.73909	122
21	0.025906	0.120013	0.000944614	40.9325	35.73909	122
22	0.026039	0.146052	0.000133038	40.9325	35.73909	122
23	0.0265942	0.172646	0.000555158	40.9325	35.73909	122
24	0.0262448	0.198891	-0.000349402	40.9325	35.73909	122
25	0.0264202	0.225311	0.000175476	40.9325	35.73909	122
26	0.0257682	0.251079	-0.000652075	40.9325	35.73909	122
27	0.0252886	0.276368	-0.000479579	40.9325	35.73909	122
28	0.0235265	0.299894	-0.00176203	40.9325	35.73909	122
29	0.0224968	0.322391	-0.00102973	40.9325	35.73909	122
30	0.0220129	0.344404	-0.000483871	40.9325	35.73909	122
31	0.0196379	0.364042	-0.00237501	40.9325	35.73909	122
32	0.0189618	0.383004	-0.000676155	44.6813	32.31615	134.796
33	0.0174587	0.400462	-0.00150311	44.6813	32.31615	134.796
34	0.0153422	0.415805	-0.00211644	44.6813	32.31615	134.796
35	0.0143106	0.430115	-0.00103164	44.6813	32.31615	134.796
36	0.0120376	0.442153	-0.00227296	44.6813	32.31615	134.796

Рис. 16. Пример таблицы обучающего сигнала

При проверке каждой траектории были введены блокировки, предотвращающие выход системы из зоны допустимых значений. При превышении давления клапан сброса давления полностью открывался, а решение, которое привело к сильному скачку давления помечалось как неэффективное путём возвращения заведомо большого значения функцией пригодности.

Рассмотрим далее процесс проектирования БЗ для управления давлением в системе.

## 5. Особенности проектирование БЗ НР

Построение терм множеств лингвистических переменных является важным этапом формирования БЗ нечётких систем, и, в особенности, нечётких регуляторов (НР).

Структура терм множества лингвистической переменной характеризуется числом и типом функции принадлежности, характеризующих элементы терм – множества данной переменной Рис 17.

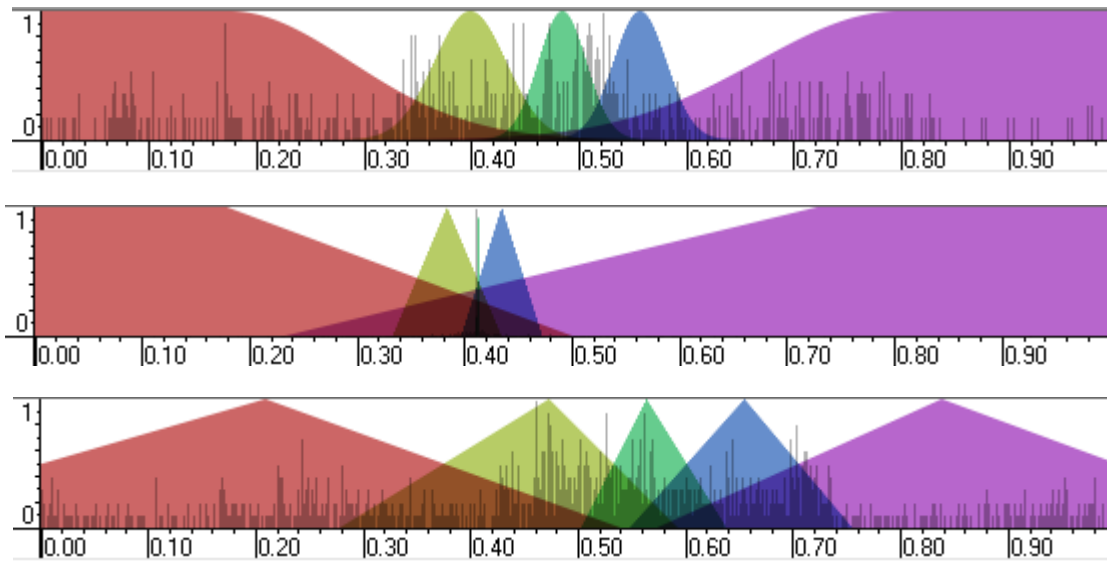


Рис. 17. Нечёткие множества лингвистических переменных входных сигналов

В практике создание БЗ нечётких систем, построение терм – множеств осуществляется экспертом на основании опыта, либо БЗ интерактивно подбирается, до достижения ее оптимальной структуры. Выбор структуры лингвистических переменных косвенно влияет на объем и адекватность получаемой базы продукционных правил. Для формирования БЗ в ИСУ применялся разработанный программный инструментариий Оптимизатор Баз знаний. Рассмотрим основные этапы проектирования БЗ рассмотрены в [10,11].

*Этап 1.* Определение типовой ситуации обучения (определение внешних шумов, начальных условий, ограничений и времени задержки).

*Этап 2.* Построение обучающего сигнала (рассмотренного в предыдущем разделе) происходит на основе извлечения оптимальной траектории изменения коэффициентов усиления с применением ГА в типовой ситуации с выбранным критерием оптимизации и областью поиска.

*Этап 3.* Выбор модели нечёткого вывода, где пользователь конкретизирует тип нечёткой модели вывода, операцию нечёткого «И» (произведение или минимум), число входных и выходных переменных интеллектуальной системы управления. В нашем примере это модель Сугено.

Пусть  $n_1, n_2, n_3$  есть количество функций принадлежности, описывающих ошибку управления  $e$ , её скорость и интеграл, тогда общее число нечётких правил будет  $n_1 * n_2 * n_3$ . Само нечёткое (продукционное) правило в БЗ выглядит следующим образом:

$$\text{IF } e \text{ IS } A_1 \text{ AND } e' \text{ IS } B_1 \text{ AND } \int e \text{ IS } C_1 \text{ THEN } K_p=D_{111}, K_d=E_{111}, K_i=F_{111},$$

где  $A_1, B_1, C_1$  - функции принадлежности, описывающие ошибку управления  $e$ , её скорость и интеграл (Рис. 17). Конечный результат нечёткого вывода в заданной БЗ вычисляется по следующим формулам:

$$K_p = \frac{\left( \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} \omega_{ijk} D_{ijk} \right)}{\left( \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} \omega_{ijk} \right)}, K_D = \frac{\left( \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} \omega_{ijk} E_{ijk} \right)}{\left( \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} \omega_{ijk} \right)}, K_I = \frac{\left( \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} \omega_{ijk} F_{ijk} \right)}{\left( \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} \omega_{ijk} \right)}$$

где  $\omega_{ijk} = A_i(e) \cdot B_j(\dot{e}) \cdot C_k(\int e)$ , и « $\cdot$ » - символ операции нечёткого умножения.

**Этап 4.** Создание лингвистических переменных для входных значений (ошибка управления, скорость ошибки управления, интегральная ошибка управления) НР. С помощью генетического алгоритма (ГА<sub>1</sub>) на основе ОС определяется оптимальное число функций принадлежности для каждой входной лингвистической переменной, а также выбирается оптимальная форма представления их функций принадлежности (треугольная, Гауссовская и т.д.). В качестве критерия оптимальности той или иной конфигурации лингвистических переменных используется максимум совместной информационной энтропии и минимум информации о сигналах в отдельности.

На рис. 18 показан пример построения лингвистических переменных с помощью ОБЗ. Как видно из рисунка, для описания входных значений ошибки управления ОБЗ с помощью ГА выбрал восемь функций принадлежности.

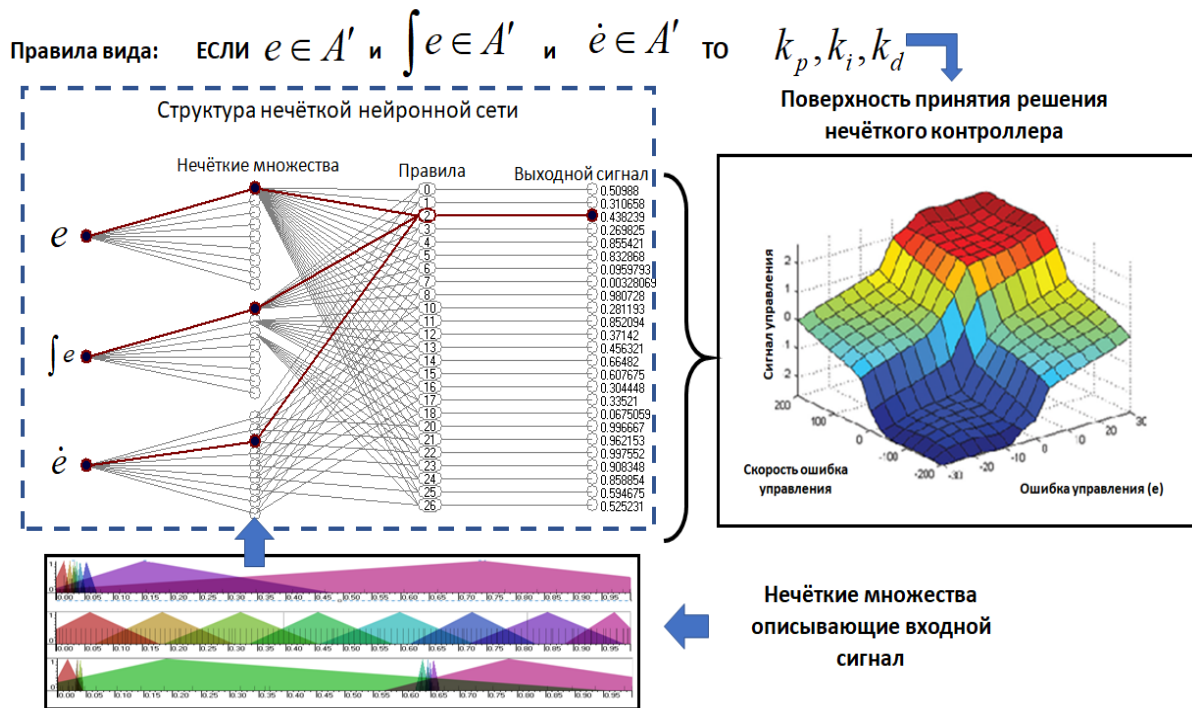


Рис. 18. Пример построения лингвистических переменных с помощью ОБЗ

**Этап 5.** Создание, оптимизация и настройка базы правил. На этапе создания БЗ используется специальный алгоритм отбора наиболее «робастных правил» в соответствии с разработанными критериями:

1) «суммарный» критерий: выбрать только те правила, которые удовлетворяют следующему условию:  $R_{total_{fs}}^l \geq TL$ , где  $TL$  (*threshold level*) - заданный (вручную или выбранный автоматически) уровень активации правила.  $R_{total_{fs}}^l$  вычисляется по следующей формуле:

$$R_{total_{fs}}^l = \sum_{k=1}^N R_{fs}^l(t_k) \text{ и } R_{total_{fs}}^l = \Pi[\mu_{j_1}^l(x_1(t_k)), \mu_{j_2}^l(x_2(t_k)), \dots, \mu_{j_n}^l(x_n(t_k))],$$

где  $t_k$  моменты времени,  $k = 1, \dots, N$ ,  $N$  равно числу точек в управляющем сигнале;  $\mu_{jk}^l(x_k)$ ,  $k = 1, \dots, n$  - функции принадлежности входных переменных,  $l$  - индекс правила в БЗ; символ « $\Pi$ » обозначает операцию нечёткой конъюнкции (в частности, может интерпретироваться как произведение).

2) «максимальный» критерий: выбрать только те правила, которые удовлетворяют условию:  $\max_t (R_{fs}^l(t)) \geq TL$ .

Далее с помощью серии генетических алгоритмов (ГА) происходит оптимизация БЗ и ее настройка. Пример построенной с помощью ОБЗ оптимальной БЗ для НР, решающего задачу управления нашего ОУ, показан на рис. 19.

Как видно из рис. 19, полная структура БЗ для данного НР состоит из 125 продукционных правил, однако ОБЗ выбрал оптимальную структуру БЗ, состоящую из 105 правил.

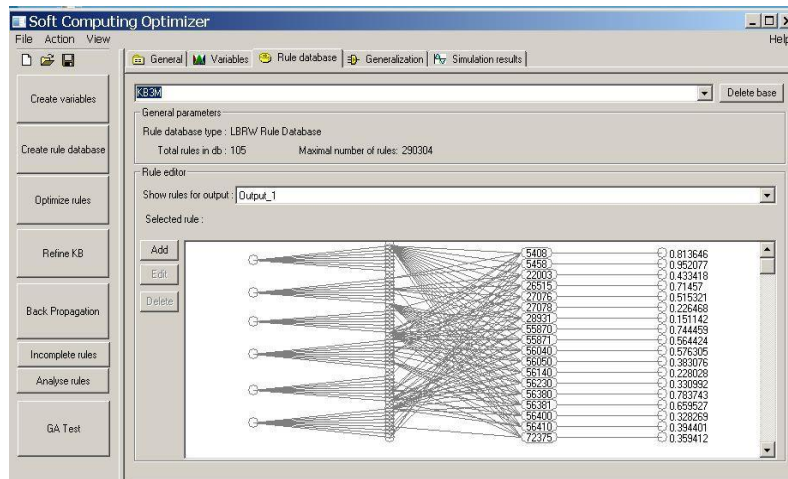


Рис. 19. Пример построенной с помощью ОБЗ оптимальной БЗ

В процессе проектирования ИСУ были получены две БЗ:

- на основе обучающего сигнала полученного с применением ГА;
- на основе сигнала, полученного из данных о работе оператора.

В табл. 2 приведены характеристики полученных с помощью ОБЗ баз знаний.

Табл. 2. Характеристики баз знаний, полученных с помощью ОБЗ

Характеристика	БЗ1	БЗ2
Модель нечеткого вывода	Сугено	Сугено
Вид функций принадлежности	Треуголь- ный	Треугольный
Количество функций принадлежности входных переменных:	[3 3 3].	[55 5].
Количество правил	8 из 27	105 из 125

На рис. 20 приведён результат аппроксимации выходных сигналов НР (синяя линия) и обучающего сигнала (зелёная линия) с заданной точностью.

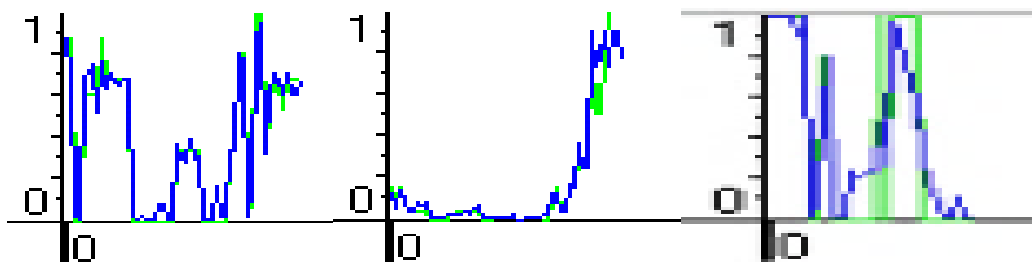


Рис. 20. Результаты аппроксимации выходных сигналов нечеткого контроллера (синяя линия) и обучающего сигнала (зеленая линия)

В следующем разделе приведены результаты моделирования применения рассмотренных систем управления.

## 6. Сравнение различных методов управления в режиме азотного охлаждения СП магнита

Рассмотрим результаты проведённых исследований в режиме азотного охлаждения.

На рис. 21 представлена временная зависимость для уровня давления (в барах) при азотном охлаждении за период около 40 мин.

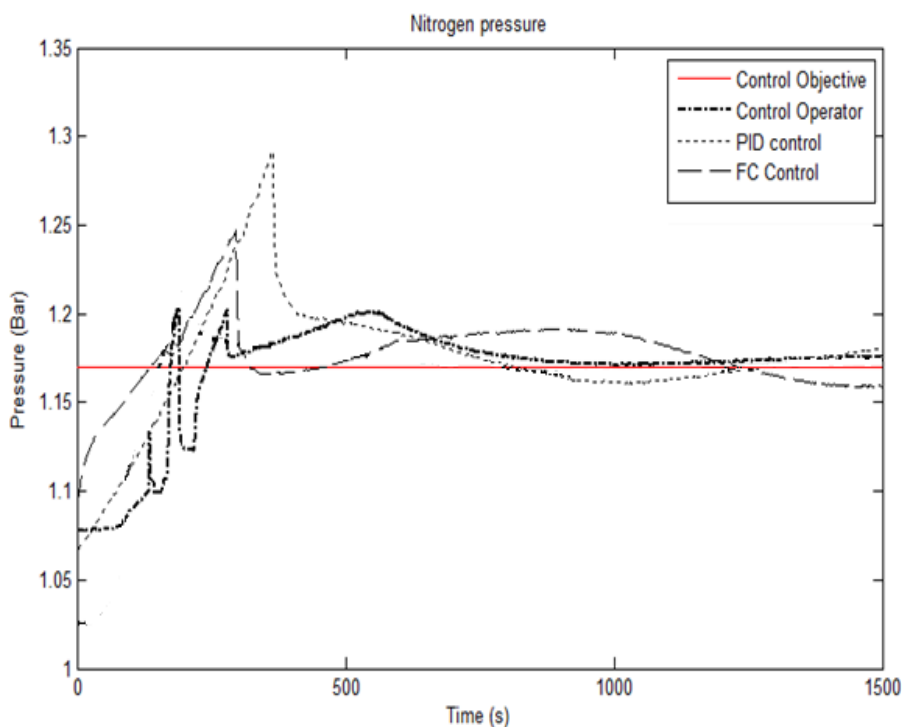


Рис. 21. Давление в азотном сборнике при азотном охлаждении

Обозначения, следующие: *Control Objective* – целевое значение давления (1.17 бар), *Control Operator* – значение давления при управлении оператором, *PID Control* – автоматизированное управление штатными средствами регулятора, *FC Control* – автоматизированное управление с помощью нечёткого регулятора.

Хорошо видно, что с задачей стабилизации давления в сборнике все регуляторы за 40 мин. в целом справляются. Однако, анализ результатов показывает, что классический ПИД-регулятор обладает низким быстродействием и высоким уровнем перерегулирования (1.29 бар), что является критическим и может рассматриваться как близкое к аварийной ситуации (1.30 бар).

При этом НР демонстрируют высокое быстродействие (время релаксации 210 соответственно) при низком уровне перерегулирования (1.24). Оператор достаточно хорошо справился с задачей установки требуемого давления (перерегулирование 1.21 бар и быстродействие 280 сек), однако не смог установить требуемое значение давления (установившейся режим 1.18 бар) (табл. 3).

Таблица 3. Сравнение критериев качества переходного процесса в азотном режиме охлаждения

Действие	Перерегулирование	Быстродействие	Сложность управления
Оператор	0.013	0.5	0.2
PID	0.021	0.78	0.5
FC (НР)	0.017	0.65	0.91



Рис. 22 демонстрирует расход полезного ресурса (азота) установки.

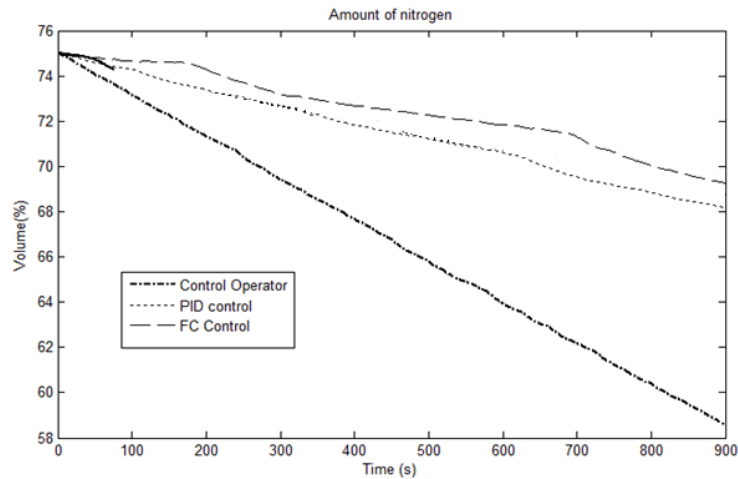


Рис. 22. Расход азота в накопительной ёмкости

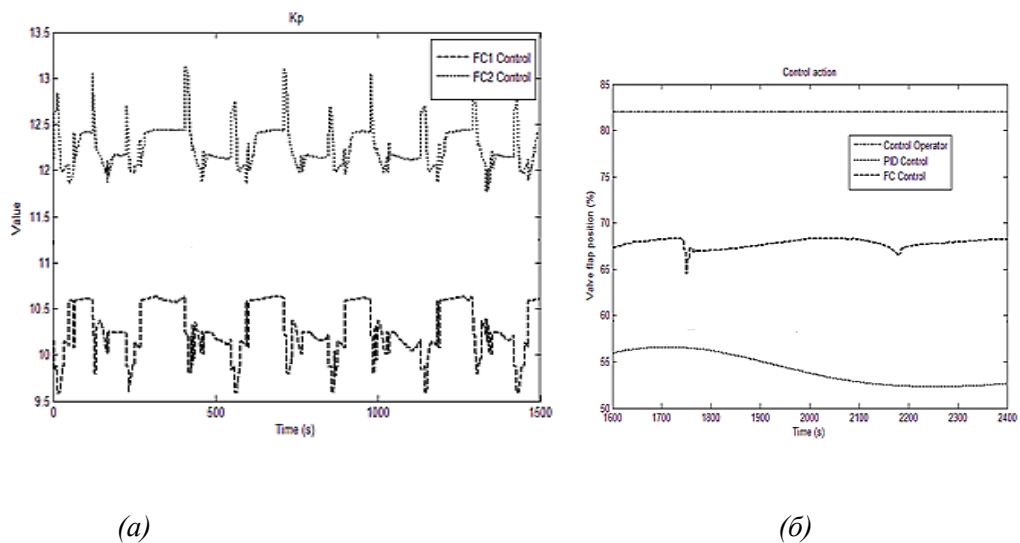
Хорошо видно, что автоматическое управление за счет непрерывного контроля демонстрирует более эффективное использование полезного ресурса и позволяет сократить расход на 50%, в частности ПИД-регулятор – на 50%, нечёткий регулятор НР – на 54%.

Одним из основных критериев качества системы управления является сложность управления. Невысокая сложность управления позволяет повысить срок службы исполнительных механизмов системы за счет более «мягкого и простого» управления.

На рис. 23(а) представлено изменение выходных значений пропорционального коэффициента усиления НР и управляющей силы ПИД-регулятора (рис. 23(б)); FC1 и FC2 – нечёткие контроллеры, спроектированные в различных ситуациях обучения.

На рис. 23(б) изображены траектории управляющих команд в процентах от уровня закрытия вентили регулировки давления при различных режимах управления и демонстрируют существенное снижение сложности физической реализуемости сил управления НР.

В качестве оценки качества системы управления рассмотрим сумму абсолютного значения отклонения давления от целевого сигнала.



(а)

(б)

Рис. 23. Управляющее воздействие: (а) выходные значения нечётких регуляторов (FC1, FC2) для пропорциональных коэффициентов усиления  $K_p$ ; (б) траектории управляющих сигналов, выполняемых оператором, ПИД-регулятором и нечётким регулятором

Рис. 24 показывает, что применение нечёткого ПИД-регулятора с интегрированными БЗ, позволяет улучшить достижение заданного уровня давления в накопительной ёмкости (уменьшить отклонение от требуемой величины).

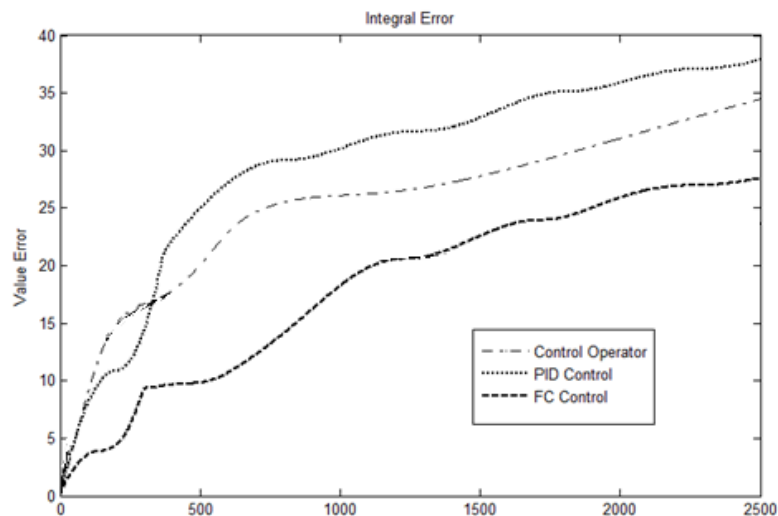


Рис. 24. Оценка качества регуляторов при управлении в режиме азотного охлаждения

Более того, с точки зрения расхода полезного ресурса, НР уменьшает расход азота более чем на 20% (рис. 23), т.е. позволяют сократить количество заправок азотом. Очень важной задачей управления в данном режиме является поддержание требуемого уровня давления при заправке азота.

Дело в том, что охлаждение должно быть непрерывным, а сам процесс заправки подразумевает снижение давления для поступления азота, при этом давление в источнике азота по сообщаемым сосудам влияет на давление в сборнике. Сложность этого режима заключается в необходимости поддержания заданного давления (для непрерывного охлаждения) и одновременной заправки накопительной ёмкости.

В этом случае важную роль играет совместное использование клапанов регулирования давления и заправки азота. Обычно оператор открывает клапан регулирования давления для сброса давления, заправляет азотом систему, а затем приступает к выравниванию давления. К данному технологическому этапу возможно применение автоматического режима, причём для одновременного синхронного управления как клапаном регулирования давления, так и клапаном подачи азота. Далее будет рассмотрен такой вариант координационного управления. Для автоматического режима управления клапаном регулирования давления были рассмотрены ПИД- регуляторы и НР.

На рис. 25 представлены результаты, иллюстрирующие процесс регулирования давления при заправке азота.

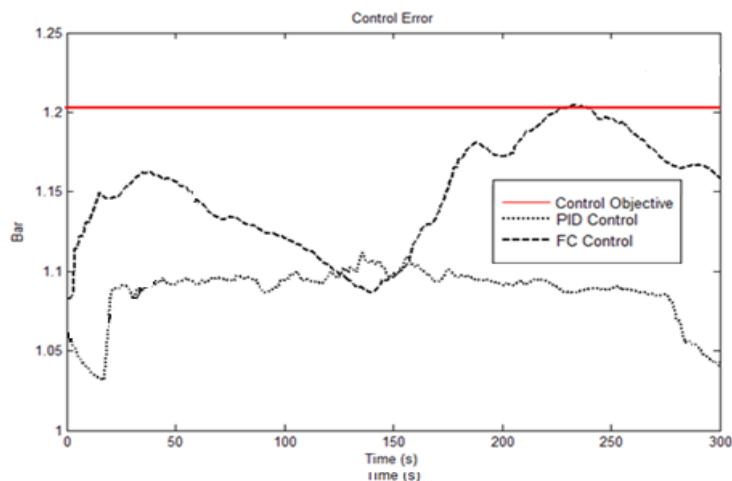


Рис. 25. Давление азота при его заправке в гелиевом режиме охлаждения токовыводов и экранов

На рис. 26 представлен обобщенный график понижения температуры азотного экрана СП магнита при управлении с помощью НР.

Предварительные результаты на рис. 26 показывают, что отепление СП - магнита в процессе заправки устраивает регламенты испытаний. Автоматическое управление на основе НР позволяет поддерживать требуемый уровень давления в процессе заправки, что позволяет уменьшить отепление магнита и поддерживать температуру в заданных диапазонах. В следующем разделе мы рассмотрим задачу координационного управления двумя вентилями – регулировки давления и заправки азота.

Данное обстоятельство показывает возможность применения интеллектуального управления при охлаждении СП магнитов в условиях оптимизации по критерию противоречивых показателей качества управления.

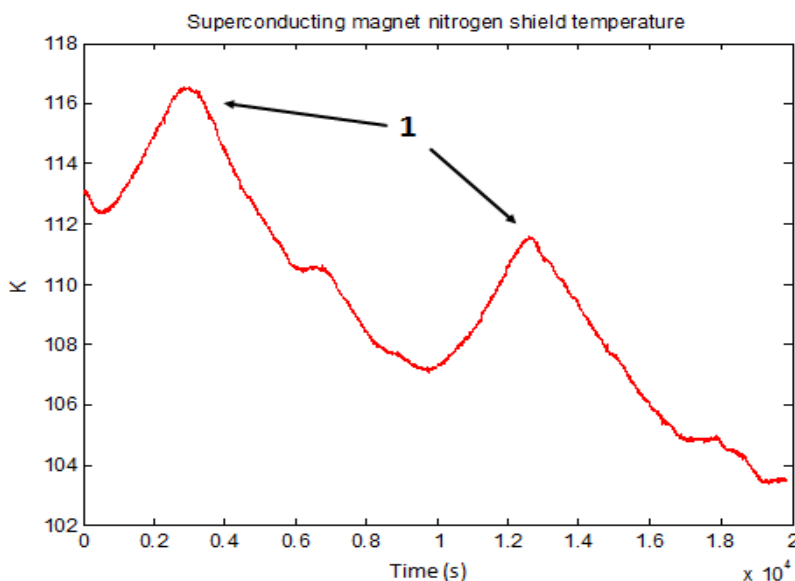


Рис. 26. Температура азотного экрана СП магнита. Стрелками (1) показан подъём температуры во время заправки

Роль дистанционного управления БЗ в этом примере заключается в передаче встраиваемых БЗ в ИСУ удалённого ОУ. В свою очередь, разработанный инструментариум реализует механизмы создания, настройки и передачи параметров управления в виде сигналов управления, полученных из БЗ НР, не изменяя нижний исполнительный уровень существующей системы (не нарушая принцип проектирования ИСУ). Подробное изложение такого подхода приведено в Главе 5.

Проведённые исследования показывают, что применение мягких вычислений в задаче управления давлением, повышают надёжность функционирования системы, уменьшая количество расхода азота и эффективно реализованы в разработанной интеллектуальной системе дистанционного управления охлаждением СП - магнита.

В данной Части 1 приведено описание действующего программно – алгоритмического комплекса дистанционного управления и его аппаратной реализации первого этапа с применением технологии мягких вычислений, реализующий разработку второго этапа в виде встраиваемых квантовых самоорганизующихся интеллектуальных регуляторов для повышения уровня устойчивого функционирования процесса азотного охлаждения СП-магнита с учётом возникновения возможных нештатных ситуаций. Второй этап подробно представлен в Части 2.

Таким образом, реализация представленных механизмов позволила получить высокий уровень качества управления, в том числе, за счёт использования мягких вычислений и разработанных технологий проектирования ИСУ. Такой подход позволяет сократить влияние экспертных оценок в процессе обучения и настройки, снижает информационный риск влияния человеческого фактора на принятие решения, в том числе, в условиях возникновения нештатных ситуаций или непредвиденных ситуаций управления.

## 7. Структура интеллектуальной системы координационного управления

Процесс заправки азота в систему охлаждения можно описать в виде последовательности технологических операций из трёх этапов. Первый этап— это продувка и охлаждение канала подачи азота, второй – поступление азота или его фактическая заправка и третий, завершающий, закрытие вентиля подачи азота – завершение заправки.

*Примечание:* Физические особенности процесса заправки азота. Технологический процесс заправки азота, таким образом, можно разделить на три стадии. На первом этапе происходит охлаждение канала подачи азота, в систему поступает газообразный азот и давление в системе регулируется вентилем подачи азота; при этом вентиль регулировки давления полностью открыт. На второй стадии, при полностью открытом вентиле подачи азота, в систему поступает жидкий азот, а задачу стабилизации выполняет вентиль регулировки давления. При достижении установленного уровня азота в сборнике, система переходит в завершающую - третью стадию, где выполняется совместная работа двух вентилях, то есть постепенное закрытие вентиля подачи азота и при этом регулировка давления вентилем давления. В этом случае существует аналогия с управлением поведения системы «каретка - перевёрнутый маятник» (рассмотренной ранее) с моделью существования существенно нелинейной связи между обобщёнными координатами вентиля расхода и вентиля давления азота как взаимодействующих объектов управления. Действие управляющей силы на одну из обобщённых координат приводит к изменению другой обобщённой координаты. При смене стадии процесса охлаждения СП – магнита объекты меняются «ролями», переходя из ведущего объекта в ведомые (аналог системы с переменной структуры «master – slave»). В исследуемом варианте такая нелинейная связь является скрытым параметром и её учёт в управлении возможен на основе квантовых корреляций в квантовом интеллектуальном регуляторе, осуществляющего координационное управление двумя указанными вентилями. Такой подход к квантовому интеллектуальному управлению изложен в Части 2.

Существующий технологический регламент, на первом этапе заправки, предполагает полностью открыть вентиль регулировки давления для сброса давления в системе и устранения возможности аварийной остановки испытаний. Стабилизация давления в этой части технологического процесса реализуется за счёт работы вентиля подачи азота. Процесс продувки сопровождается резкими непредвиденными скачками давления. В это время происходит охлаждение канала подачи азота и его вскипание на стенках трубы, что и приводит к резкому росту и непредсказуемым ситуациям. В момент, когда вентиль подачи азота открыт полностью, а давление выше целевого значения, требуемый уровень давления начинает поддерживать вентиль сброса давления.

В начале второго этапа, происходит резкое падение давления, т.к. в систему начинает поступать не газ, а жидкий азот, при этом вентиль подачи азота открыт полностью, чтобы увеличить скорость подачи азота и заправки. Регулировку давления реализует вентиль сброса давления.

При достижении требуемого уровня азота в накопительной ёмкости, на заключительном этапе, вентиль подачи азота начинает плавное закрытие, вызывая просадку падения давления, которое необходимо компенсировать работой вентиля сброса давления. На этом этапе реализуется совместная работа вентилях. Во многом заправка зависит от давления внутри танка (резервуара с азотом, источника азота), также процесс зависит от загруженности смежных сателлитов, т.к. заправка происходит по общему каналу подачи азота длина которого составляет более 15 метров. Скорость и качество заправки зависит и от типа тестируемого магнита, режима испытаний и условий окружающей среды.

В табл. 4 представлены критерии оценки качества системы управления.

Таблица 4. Технологические этапы заправки, типы структур управления и критериев оценки качества управления

Этап охлаждения и его описание	Источник обучающего сигнала	Типы контроллеров	Критерий оценки	Факторы	Общие критерии
Начало заправки. Система продувается, канал подачи азота охлаждается. Вентиль подачи азота – регулирует давление. Вентиль сброса – открытый	Генетический алгоритм и Сигнал управления оператора	Классический пропорционально-интегрально-производный регулятор Нечеткий контроллер	Последовательная работа вентилях подачи и сброса давления - контроль давления азота.	Давление источника азота. Температура трубопровода подачи азота.	Температура охлаждаемых элементов Расход азота Скорость заправки Давление в системе
Азотное заполнение. Охлаждение трубки подачи азота завершено, азот поступает в систему. Вентиль подачи – открыт. Вентиль сброса – регулирует давление	Генетический алгоритм		Вентиль сброса давления, контролирует давление в системе	Давление источника азота. Тип охлаждающего элемента. Количество проверенных элементов	
Завершение заправки. Закрытие вентиля подачи азота.	Генетический алгоритм		Совместна работа вентилях подачи азота – (скорость закрытия и давление азота) вентиль сброса давления – давление в системе	давление в источнике азота. Тестовый режим и работа магнита	
Охлаждение. Вентиль сброса давления – регулирует давление. Вентиль подачи – закрытый	Генетический алгоритм		Вентиль сброса давления контролирует давление в системе	Режим тестирования и работа магнита	

Отметим, что на всех этапах важно поддерживать требуемое давление, что в свою очередь влияет на температурные эффекты охлаждаемых элементов – тоководов и экранов магнита. Так же важным критерием является скорость заправки, так как при загрузке смежных сателлитов заправка выполняется последовательно. Промедление в заправке может привести к остановке тестирования магнита.

Таким образом, необходимо реализовать систему управления, поддерживающую требуемое давление в системе с координационным управлением вентилях заправки и сброса давления.

Описание технологии проектирования БЗ с применением мягких вычислений представлено в [11, 17]. На рис. 27 представлена структура координационной системы управления азотного контура криогенной установки. с применением технологий мягких вычислений.

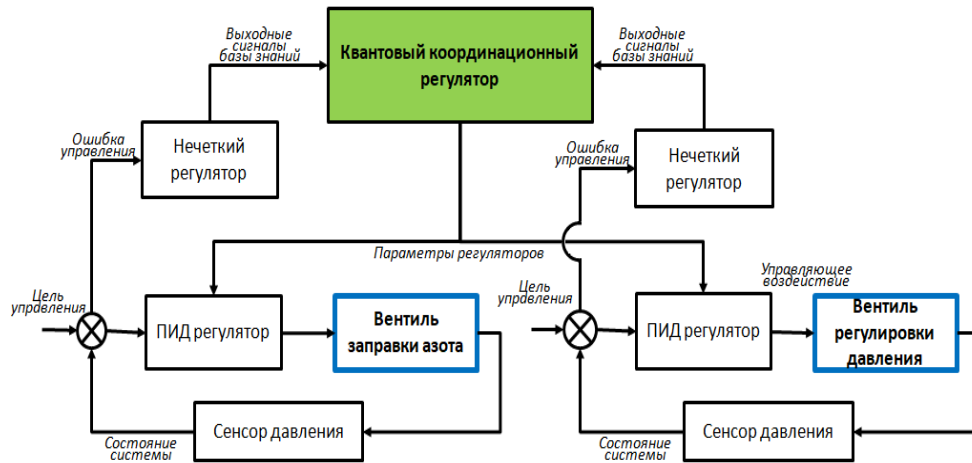


Рис. 27. Структура ИСУ азотного контура испытательного стенда [19]

Параметры ПИД-регуляторов вентилей заправки и сброса давления формируются за счет применения НР. Такой подход позволяет в реальном времени реализовать процесс формирования интеллектуального робастной управления процессом заправки спутникового сборника азота.

В качестве примечания нужно отметить, что первоначально такой подход к управлению был апробирован на робототехническом полигоне применительно к механической системе «каретка – перевёрнутый маятник» со скрытыми нелинейными перекрёстными связями между обобщёнными координатами (степенями свободы) [16].

В рамках выполненной работы программно-аппаратные решения, реализующие квантовый координационный регулятор, были внедрены в контур управления криогенной установки.

В качестве иллюстрации результатов на рис. 28 представлен графики изменения давления в системе.

Примечание. Предварительно показан также результат работы квантового координационного регулятора на основе квантового нечёткого вывода. Приведённый результат экспериментально подтверждает существование эффекта квантового преимущества применения квантового поискового алгоритма – квантового нечёткого вывода в задачах интеллектуального координационного управления (см., Часть 2).

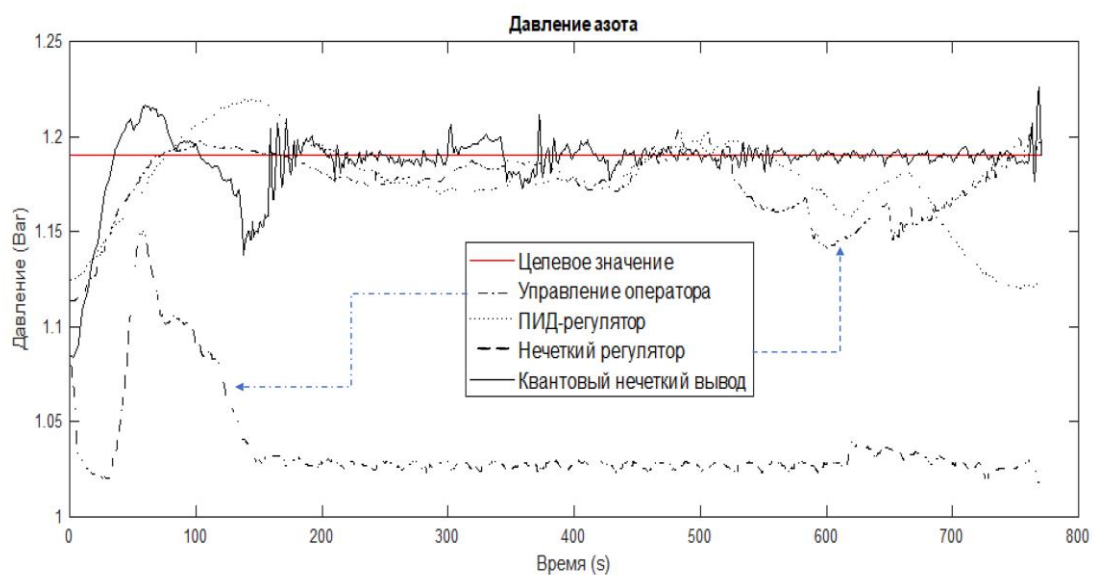


Рис. 28. Динамика давления азота в системе на этапе заправки

На рис. 29 представлена температура охлаждаемых элементов при различных типах управления.

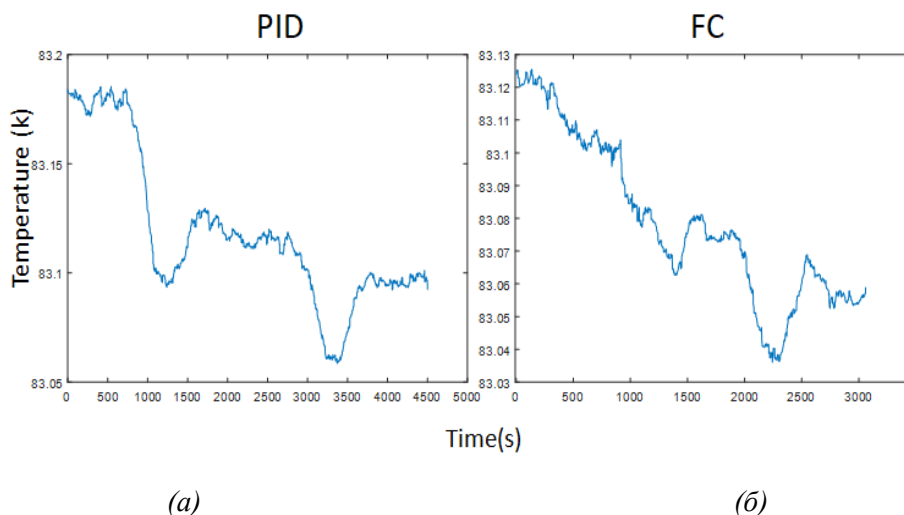


Рис. 29. Температура охлаждаемых элементов на этапе заправки при управлении: а) ПИД - регулятором, б) нечётким регулятором

Из рис. 28 и 29 видно, что при реализации нечёткого координационного управления «скачки» температуры значительно меньше. Данное обстоятельство показывает эффективность применения технологий интеллектуального управления в подобных системах.

Анализ представленных результатов дополнил и усилил результаты работы [17].

Подробный анализ результатов координационного управления на основе структуры на рис. 27 приведён в Части 2.

## 8. Сравнительный анализ работы различных типов регуляторов

Для демонстрации эффективности НР сравним эффективность работы установки с применением разных типов регуляторов: НР, классический ПИД-регулятор, ручное управление оператора. Сравнение показано ниже для режима заправки, так как этот режим является наиболее сложным с точки зрения управления, поскольку динамика давления неустойчива (аналог перевернутого маятника). Как отмечалось выше, процесс заправки азота в систему охлаждения можно описать в виде последовательности технологических операций из трёх этапов. Первый этап— это продувка и охлаждение канала подачи азота, второй – поступление азота или его фактическая заправка и третий, завершающий, закрытие вентиля подачи азота – завершение заправки.

График изменения давления азота в процессе заправки при управлении ПИД - регулятором приведён на рис. 30.

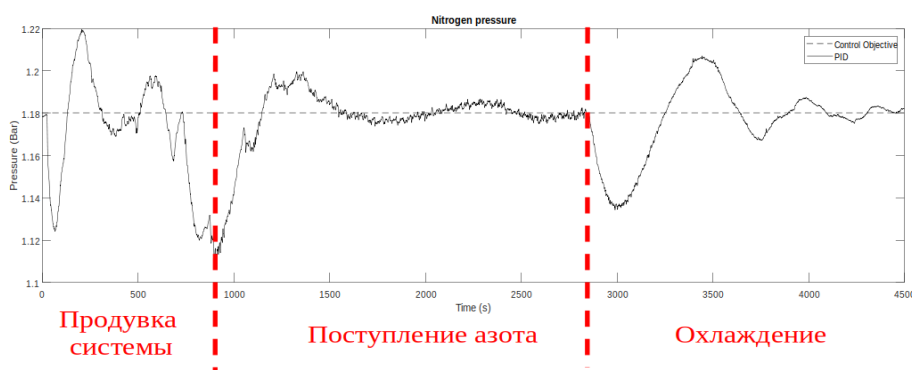


Рис. 30. Изменение давления в установке при работе в режиме заправки под управлением ПИД регулятора

Стабилизация давления в первой части технологического процесса реализуется за счёт работы вентиля подачи азота. Процесс продувки сопровождается резкими скачками давления. В это время происходит охлаждение канала подачи азота и его вскипание на стенках трубы, что и приводит к непредсказуемым перепадам давления. В момент, когда вентиль подачи азота открыт полностью, а давление отличается от целевого значения, требуемый уровень давления начинает поддерживать вентиль линии сброса давления.

В начале второго этапа, происходит резкое падение давления, т.к. в систему начинает поступать не газ, а жидкий азот, при этом вентиль подачи азота открыт полностью, чтобы увеличить скорость подачи азота и заправки. Регулировку давления реализует вентиль сброса давления. В случае, если вентиль сброса давления открыт полностью (что происходит крайне редко), предусмотрено возвращение управления к вентилю подачи азота, до тех пор, пока он не откроется полностью вновь.

На заключительном этапе, при достижении требуемого уровня азота в накопительной ёмкости вентиль подачи азота начинает плавное закрытие, вызывая падение давления, которое необходимо компенсировать работой вентилем сброса давления. На этом этапе реализуется совместная работа вентилей.

Во многом заправка зависит от давления внутри хранилища азота, но также на процесс заправки влияет режим заправки смежных резервуаров, т.к. заправка происходит по общему каналу подачи азота, длина которого составляет более 15 метров. Скорость и качество заправки зависят также от типа тестируемого магнита и режима испытаний.

Для сравнения качества управления рассмотрим три типа управления: ручное управление оператора, классический ПИД-регулятор и НР.

НР был сформирован на основе полученного обучающего сигнала с помощью программного обеспечения SCOptKB™ [11,14,15]. Коэффициенты усиления классического ПИД-регулятора были подобраны на основе обобщения опыта операторов криогенной установки и многократно протестированы в условиях реального эксперимента. Ниже приведены графики изменения давления при работе трёх типов регуляторов.

На рис. 31 представлен график изменения давления при ручном режиме управления оператором.

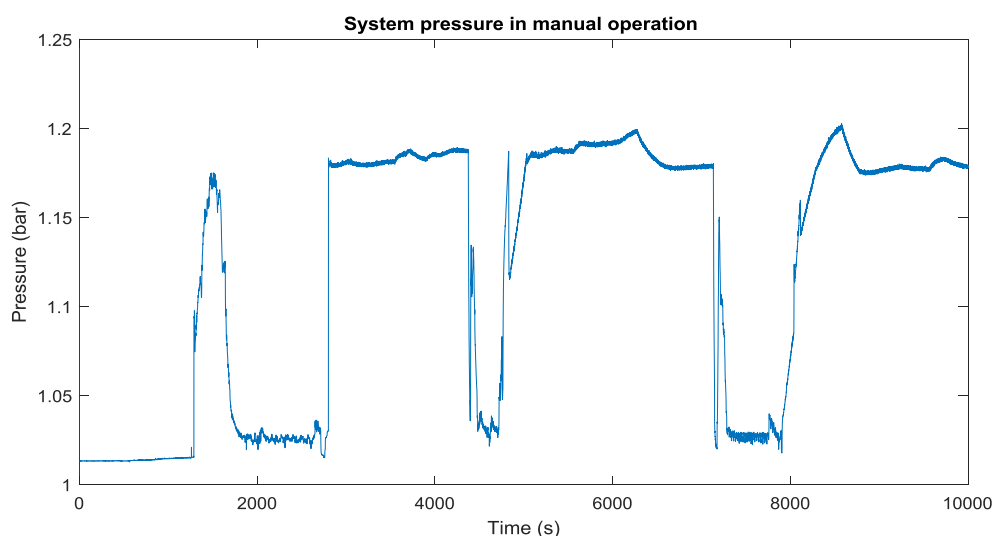


Рис. 31. Давление азота при управлении оператором

Рис. 32 иллюстрирует давление в системе при работе классического ПИД - регулятора с постоянными параметрами.



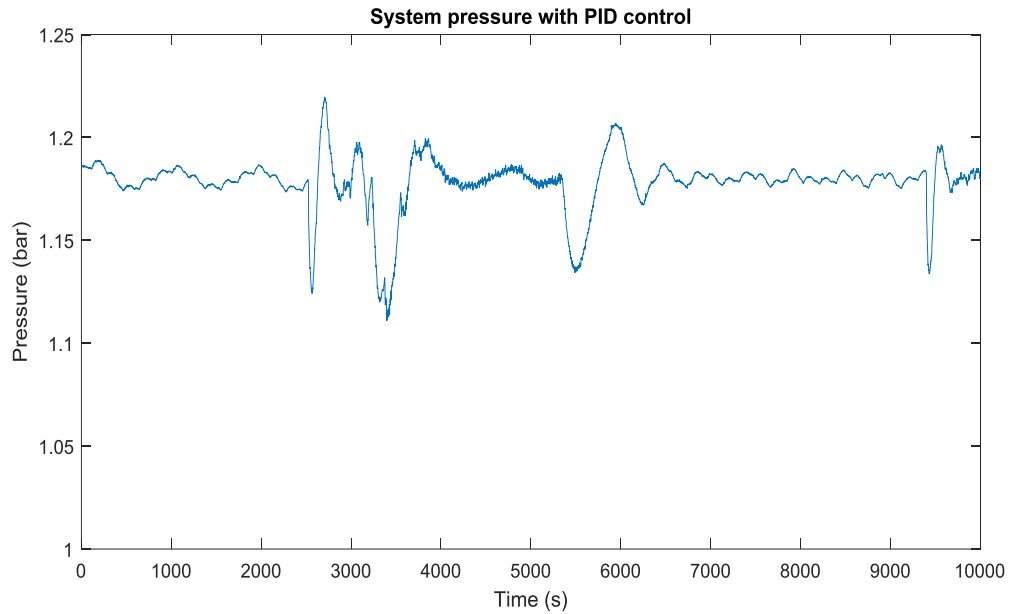


Рис. 32. Давление азота при ПИД управлении

На рис. 33 представлена динамика давления при управлении НР.

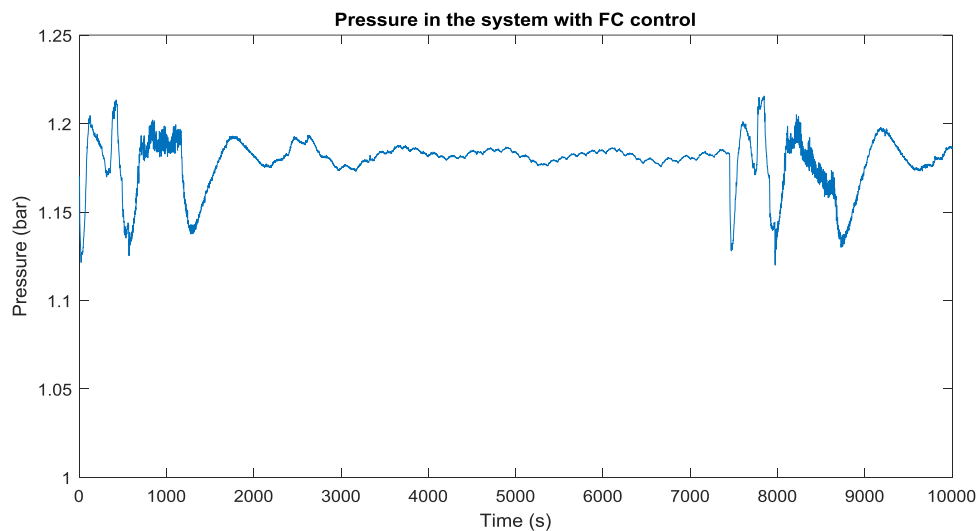


Рис. 33. Давление азота при НР – управлении

Проведем оценку качества управления на основе интегральных показателей качества управления [11,17].

На рис. 34. приведены графики изменения давления в системе при работе в режиме заправки для отмеченных ранее этапов 2 и 3. Процесс заправки завершается снижением давления ниже целевого значения, так как вентиль подачи азота перекрывается, и установка переходит в штатный режим работы.

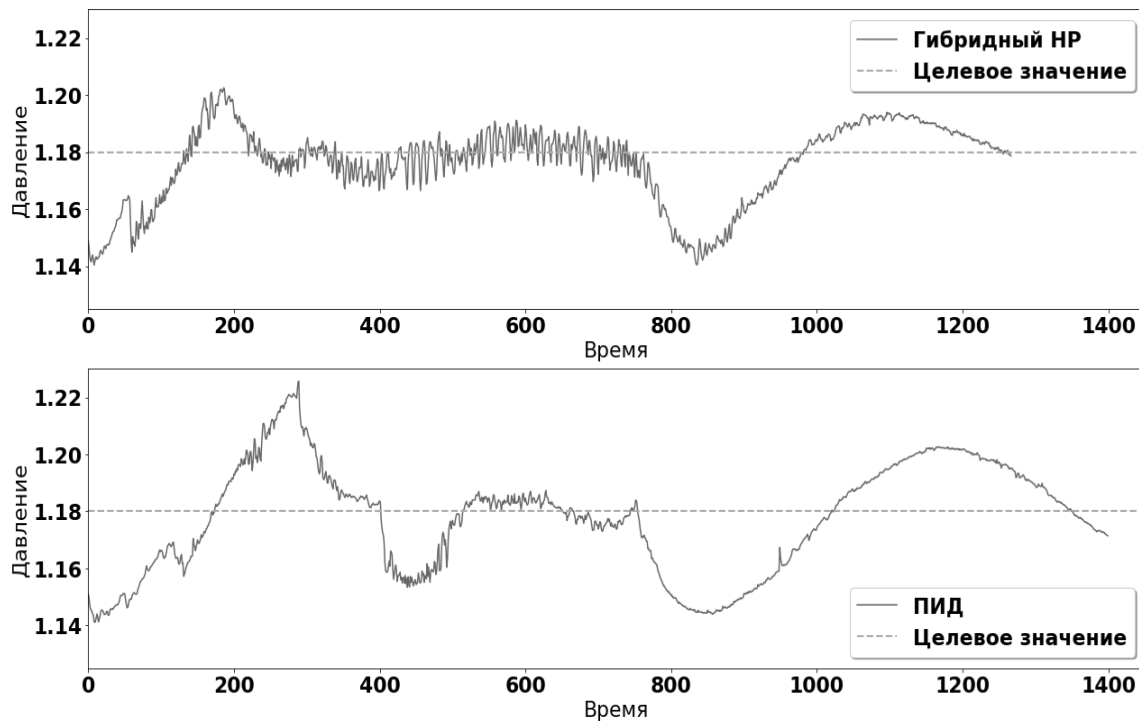


Рис. 34. Сравнение работы двух регуляторов в режиме заправки

На рис. 35 представлены временные зависимости интегральной ошибки для гибридного НР и классического ПИД-регулятора.

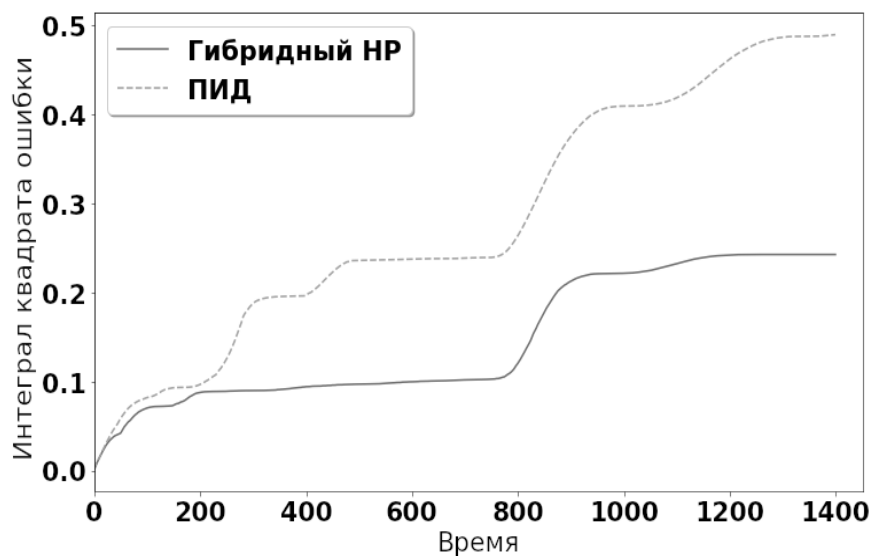


Рис. 35. Изменение интегральной ошибки в процессе работы регуляторов

Хорошо видно, что величина ошибки в случае использования ПИД-регулятора практически вдвое превышает аналогичную величину для гибридного НР-регулятора во всем диапазоне измерений.

На рис. 36 представлены фазовые портреты изменения ошибки и скорости ошибки управления для различных видов регуляторов с выделенными зонами притяжения (аттракторы) устойчивости процесса управления.

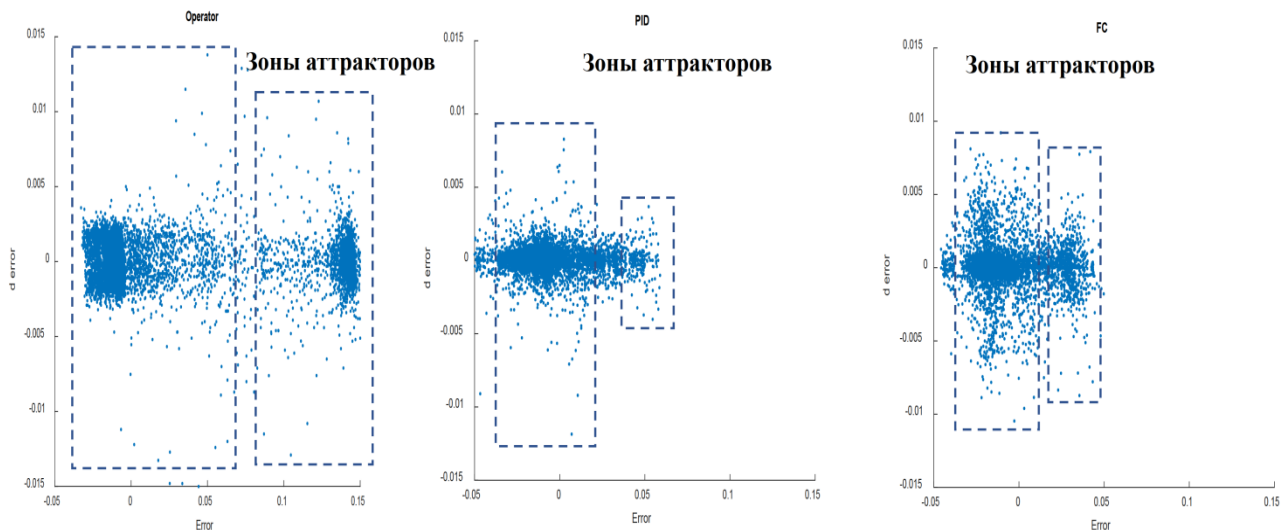


Рис. 36. Фазовые портреты динамического поведения регуляторов

На рис. 37 приведены законы изменения параметров коэффициентов усиления исследуемых типов регуляторов.

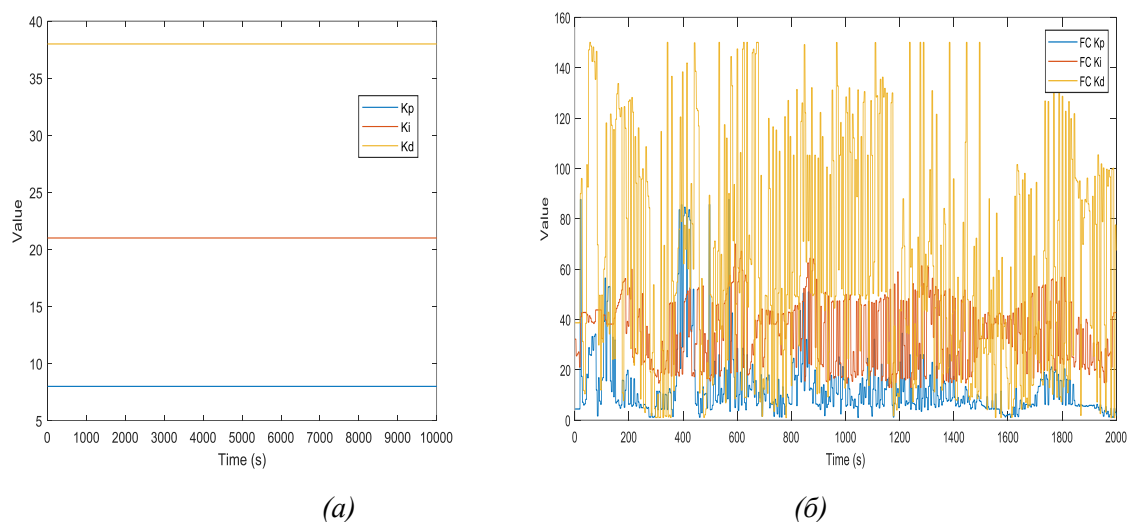


Рис. 37. Коэффициенты усиления (а) классического ПИД регулятора и (б) нечёткого регулятора.

Результаты, представленные на рис. 28–37, свидетельствуют о повышении управляемости и устойчивости динамики давления азота в системе на этапе заправки при применении нечеткого регулятора.

Проведем оценку устойчивости управления на основе фазового портрета функционирования регулятором.

Из результатов на рис. 36 следует, площадь зоны аттрактора (аналог экспоненты Ляпунова) меньше соответствующих величин, полученных от управления оператором и ПИД-регулятора. Этот факт объясняется тем, что БЗ нечёткого регулятора формировалась на основе физического (информационно – термодинамического) закона об оптимальном распределении устойчивости, управляемости и робастности, а также минимума производства и скорости производства энтропии в ОУ и регуляторе.

Скорость производства энтропии регулятором определяется скоростью ошибки управления. Из рис. 36 видно, что нечёткий контроллер имеет меньшую скорость изменения ошибки управления и, следовательно меньшую скорость производства энтропии (потери полезного ресурса). Разработанная БЗ нечёткого регулятора позволяет компенсировать неполноту информации об ОУ и сформировать оптимальное управление с минимальными потерями полезного ресурса.

В рамках представленных результатов поставленной задачи предложена информационная технология для создания распределенной ИСУ на основе встраиваемых в контур управления интеллектуальных нечётких регуляторов, позволяющая эффективно встраиваться в уже работающую систему управления без изменения её исходной структуры. Разработанный инструментарий позволяет:

- Включаться в системы, работающие на базе фреймворка TANGO Controls или на базе спецификации OPC Unified Architecture (UA) [10].
- Использовать для построения набора продукционных правил БЗ внешние вычислительные ресурсы.
- Дистанционно настраивать различные ОУ, при этом используя реальные данные, полученные непосредственно с датчиков системы.
- Встраивать ИСУ в действующую систему управления нижнего уровня на базе стандартных протоколов обмена данными [11], повышая эффективность работы.

Применяемый метод для решения поставленной задачи позволил повысить качество управления в автоматическом режиме, существенно уменьшить расход азота и поддерживать на требуемом уровне давление в контуре.

## Выводы

На комплексе *NICA* развивается широкая программа прикладных исследований и в этих условиях эффективное решение задачи создания интеллектуальной системы управления комплексом *NICA* подразумевает применение современных интеллектуальных вычислений и «робастных» информационных технологий, представляющих собой совокупность методов теории интеллектуального управления, которые обеспечивают хорошее качество управления, даже если объект управления отличается от расчётного или его математическая модель неизвестна.

Необходимость применения Интеллектуальных информационных технологии (ИИТ) обусловлена необходимостью повышения эффективности решения задач автоматического управления комплексом *NICA*, а именно добавлением свойств адаптации, обучения и самоорганизации с целью обеспечения устойчивости, повторяемости и надёжности требуемых режимов работы - ускорения ионов, их накопления в кольцах коллайдера, поддержание заданных параметров режима столкновений пучков в физическом эксперименте.

В данной работе было представлено описание основных измерительных и управляющих элементов установки. Анализ показывает, что режимы ручной настройки и управления такой сверх сложной и распределенной системой, потребует развития новых программных инструментариев в сервисный набор оператора установки, которые позволили бы уменьшить время настройки системы и повысить эффективность её функционирования.

Результаты исследований и проведённых экспериментов подтверждают работоспособность разработанных программных инструментов, основанных на мягких вычислениях.

Практическая реализация. В проведённой работе апробированы все этапы технологии проектирования встраиваемых ИСУ на основе мягких вычислений, что позволило:

- осуществить проектирование оптимальной ИСУ с максимальным уровнем надёжности и управляемости сложным объектом управления в условиях неопределённости исходной информации;
- спроектировать робастную систему управления при отсутствии математической модели системы, используя данные, измеряемые на реальной установке.

Благодаря применению ГА обучающий сигнал может быть создан без использования математической модели установки. Эта особенно важно для систем управления, содержащих объект управления с недоопределёнными, слабо формализованными параметрами.

Подбор траектории изменения коэффициентов классического ПИД-регулятора позволяет добавлять в систему свойства адаптивности и обучаемости без необходимости внесения изменений в существующую систему управления.

НР может работать в качестве интеллектуальной надстройки над уже работающей системой управления, повышая её устойчивость. Не изменяя существующий исполнительный уровень управления повысить надёжность и эффективность всей системы управления.

### Список источников

1. NICA Project at JINR / V. Kekelidze , R. Lednicky, V. Matveev [et al.] // Письма в ЭЧАЯ. 2012. Т. 9. №. 4-5(174-175). -С. 521-526.
2. Passport of the NICA Accelerator Complex. Functional Requirement Specification. Project NICA/MPD / Ed. by I. Meshkov, G. Trubnikov, A. Sidorin. Dubna: JINR, 2015.
3. Развитие методов охлаждения ионов / Н. С. Диканский, И. Н. Мешков, В. В. Пархомчук , А. Н. Скринский // Успехи физических наук. 2018. Т. 188. № 5. С. 481-492. DOI: 10.3367/UFNr.2018.01.038297.
4. Дрёмин И. М. Некоторые новые открытия на коллайдерах // Успехи физических наук. 2018. Т. 188. № 4. С. 437-445. DOI: 10.3367/UFNr.2018.01.038284.
5. Релятивистская ядерная физика в ОИЯИ: от синхрофазотрона к коллайдеру NICA / Н. Н. Агапов, В. Д. Кекелидзе, А. Д. Коваленко [и др.] // Успехи физических наук. 2016. Т. 186. № 4. С. 405-424. DOI: 10.3367/UFNr.0186.201604c.0405.
6. Бустер комплекса NICA: сверхпроводящий синхротрон нового поколения / А. В. Бутенко, О. И. Бровко, А. Р. Галимов [и др.] // Успехи физических наук. 2023. Т. 193. № 2. С. 206-225. DOI: 10.3367/UFNr.2021.12.039138.
7. Необходимость применения интеллектуальных систем управления в экспериментальных ядерно-физических комплексах (типа NICA). Ч. I: Проблема нештатных ситуаций / О. И. Бровко, А. В. Елисеев, В. Д. Кекелидзе [и др.] // Системный анализ в науке и образовании. 2019. № 4. С.32-57. DOI: 10.37005/2071-9612-2019-4-32-57.
8. Возможности применения сквозных квантовых информационных технологий в интеллектуальных системах управления слабо формализованными физическими объектами (типа комплекс NICA) / В. В. Кореньков, А. Г. Решетников, Г. П. Решетников, С. В. Ульянов // Системный анализ в науке и образовании. 2018. № 4. С. 10-53.
9. Ульянов С. В. Квантовая релятивистская информатика. Т. 1,2. Москва: Курс, 2023.
10. Ульянов С. В., Решетников Г. П. Технологии интеллектуальных вычислений. Мягкие и дробные вычисления в интеллектуальном управлении : учебно-методическое пособие. Дубна: УНЦ ОИЯИ, 2013. 244 с.
11. Ульянов С. В., Решетников А. Г., Решетников Г. П. Технологии интеллектуальных вычислений. Квантовые вычисления и программирование в самоорганизующихся интеллектуальных системах управления: учебно-методическое пособие. Дубна: УНЦ ОИЯИ, 2015. 246 с.
12. TANGO REST API // Tango Documentation Contents. Tango Community, 2017-2023. URL: <https://tango-controls.readthedocs.io/en/latest/development/advanced/rest-api.html>.
13. Control system of the superconducting magnet test bench for the NICA accelerator complex / G. S. Sedykh , E. V. Gorbachev, A. E. Kirichenko [et al.] // Proceedings of the XXVI International Symposium on Nuclear Electronics & Computing (NEC'2017). Becici, Budva, Montenegro, September 25 - 29, 2017.
14. Ulyanov S. V. et al. Soft computing optimizer of intelligent control system structures. US Patent No US 7,219,087 B2. Date of Patent: May 15, 2007.
15. Ulyanov S. V. System for soft computing simulation. US Patent No US 2006/0218108. Filed: Oct. 4, 2005. Date of Patent: Sep. 28, 2006.
16. Ulyanov S. V. Self-organizing quantum robust control methods and systems for situations with uncertainty and risk. US Patent US 8788450 B2, 2014.

17. Интеллектуальная система дистанционного управления давлением и расходом жидкого азота в криогенной системе сверхпроводящих магнитов: программно-аппаратная платформа / А. В. Бутенко, П. В. Зрелов, В. В. Кореньков [и др.] // Письма в ЭЧАЯ. 2023. Т. 20. № 2(247). С. 183–199.
18. Панченко Т. В. Генетические алгоритмы / под редакцией Тарасевича Ю.Ю. Астрахань : Издательский дом «Астраханский университет», 2007. – 87 с.